

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/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Bezak, N. 2016. Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi. Doktorska disertacija. = Fluvial transport of suspended sediments related to other hydrologic processes. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 58 str. (mentor: prof. dr. Matjaž Mikoš, somentorica: doc. dr. Mojca Šraj).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5516/>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidat:
NEJC BEZAK

**POVEZANOST FLUVIALNEGA PREMEŠČANJA
SUSPENDIRANIH SNOVI Z DRUGIMI HIDROLOŠKIMI
PROCESI**

Doktorska disertacija št.: 37/GO

**FLUVIAL TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENTS
RELATED TO OTHER HYDROLOGIC PROCESSES**

Doctoral thesis No.: 37/GO

Komisija za doktorski študij je na 6. seji, 13. maja 2014, po pooblastilu s 30. seje Senata Univerze v Ljubljani z dne 20. januarja 2009, dala soglasje k temi doktorske disertacije.

Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Matjaž Mikoš,
za somentorico pa doc. dr. Mojca Šraj.

Ljubljana, 5. maj 2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, UL FGG,
- doc. dr. Dušan Žagar, UL FGG,
- prof. dr. Ognjen Bonacci, upok., prof. Emeritus Univerza v Splitu, Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu,
- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,
- doc. dr. Mojca Šraj, UL FGG,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 9. seji, 26. marca 2014.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Dušan Žagar, UL FGG,
- prof. dr. Ognjen Bonacci, upok., prof. Emeritus Univerza v Splitu, Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu,
- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 23. seji, 4. novembra 2015.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Dolšek, prodekan UL FGG, predsednik,
- prof. dr. Matjaž Mikoš, UL FGG, mentor,
- doc. dr. Mojca Šraj, UL FGG, somentorica,
- izr. prof. dr. Dušan Žagar, UL FGG,
- prof. dr. Ognjen Bonacci, upok., prof. Emeritus Univerza v Splitu, Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu,
- prof. dr. Marina Pintar, UL BF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 27. seji, 30. marca 2016.

STRAN S POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Nejc Bezak izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom **Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi**.

Izjavljam, da je elektronska različica enaka tiskani različici.

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

Ljubljana, 15.4.2016

Nejc Bezak

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	556.512:551.311.21:(497.12):(043)
Avtor:	Nejc Bezak
Mentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentorica:	doc. dr. Mojca Šraj
Naslov:	Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi
Tip dokumenta:	doktorska disertacija
Obseg in oprema:	58 str., 6 pregl., 29 sl., 2 en., 9 pril. (155 str.)
Ključne besede:	Sedimenti, erozija tal, modeliranje, funkcije kopula, eksperimentalno porečje

Izvleček

Razumevanje in poznavanje procesov, ki sestavljajo vodni oziroma hidrološki ter erozijsko-sedimentacijski krog, ki se medsebojno prepletata, je pomembno z vidika varstva pred naravnimi nesrečami ter zagotavljanja ustreznih pogojev za življenje (npr. pitna voda). V doktorski disertaciji so obravnavani naslednji procesi: fluvialno premeščanje suspendiranih snovi, površinski odtok vode, padavine ter erozijski procesi.

V disertaciji so najprej opisani in predstavljeni hidrološki procesi, sledi opis merskih metod, ki so bile uporabljene za izvedbo meritev. Nadalje je podan opis obravnavanih porečij vključno z eksperimentalnim porečjem, kjer so se meritve z visoko frekvenco vzorčenja izvajale v okviru doktorske disertacije, sledi opis uporabljenih statistično-matematičnih metod, ki so bile uporabljene za analizo podatkov, pri tem je poudarek na funkcijah kopula, ki omogočajo hkratno analizo dveh ali več v naravi bolj ali manj odvisnih spremenljivk. V zadnjem poglavju prvega dela disertacije pa so prikazane osnove modeliranja erozije tal s poudarkom na modelu WATEM/SEDEM.

V drugem delu disertacije so prikazani rezultati različnih terenskih meritev (npr. meritve fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi, padavin, pretokov, erozije tal), izvedena je analiza povezanosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi, prikazani so rezultati modeliranja erozije tal ter uporabe funkcij kopula.

Ugotovili smo, da imajo padavinski dogodki velikih intenzitet nadpovprečen vpliv na procese sproščanja, premeščanja in odlaganja erozijskega materiala. Količine premeščenega materiala so lahko pri teh dogodkih nekaj velikostnih razredov večje od dolgoletnega povprečja. V Sloveniji do nastopa konice fluvialno premeščenih suspendiranih snovi večinoma prihaja pred nastopom konice pretoka, pri tem pa so časovne razlike večinoma relativno majhne (do 1 dneva). Nadalje se količine fluvialno premeščenih suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih večinoma zmanjšujejo, kar je lahko posledica različnih vzrokov, kot sta zaraščanje površja zaradi opuščanja kmetijske obdelave ter zapiranje rudnikov. Z aplikacijo modela WATEM/SEDEM na 5 porečjih v Sloveniji je bilo ugotovljeno, da se koeficient odplavljanja zmanjšuje z večanjem prispevnega območja. Funkcije kopula pa so bile uporabljene za multivariatne verjetnostne analize poplavnih dogodkov, kjer smo hkrati upoštevali konice pretokov, volumne visokovodnih valov ter trajanja visokovodnih valov, poleg tega pa smo funkcije kopula uporabili tudi za analizo podatkov o suspendiranih snoveh ter za ocenjevanje vrednosti fluvialno premeščenih suspendiranih snovi na podlagi podatkov o pretokih in padavinah.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.512:551.311.21:(497.12):(043)
Author: Nejc Bezak
Supervisor: prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.
Cosupervisor: assist. prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Title: Fluvial transport of suspended sediments related to other hydrologic processes
Document type: doctoral dissertation
Scope and tools: 58 p., 6 tb., 29 fig., 2 eq., 9 ann. (155 p.)
Keywords: Sediments, soil erosion, modelling, copula functions, experimental catchment

Abstract

Understanding and knowledge about the processes that define water or hydrologic cycle and erosion-sedimentation cycle (these two cycles are inter-connected) is important in order to ensure safety during natural disasters and to provide sufficient conditions for life (e.g. drinkable water). In the presented thesis we investigated next processes: fluvial transport of suspended sediments, surface runoff, rainfall and erosion processes.

Firstly, the investigated hydrological processes are described, then the measuring methods are presented. Further, the investigated catchments including experimental catchment where high-frequency measurements were performed are described, in the next section the statistical-mathematical tools that were used for data analysis are shown. The emphasis was given to the copula functions that can be used for simultaneous study of two or more (in)dependent variables that define the environmental process. In the last section of the first part of thesis, the basic concepts of soil erosion modelling are presented where the emphasis was given to the WATEM/SEDEM model that can be used for soil erosion modelling.

In the second part of the thesis, results of field measurements are presented (e.g. measurements of fluvial transport of suspended sediments, rainfall, discharge and soil erosion), analysis of connection between fluvial transport of suspended sediments and other hydrological processes was carried out, soil erosion modelling results are described and application of copula functions is shown on practical examples.

The main conclusions are: rainfall events that have large rainfall intensities have significant impact on erosion, transport and deposition processes. During these kinds of events the suspended sediment budgets can be for a few orders of magnitude larger than the long-term annual rates. In Slovenia the peak of the suspended sediment transport mostly occurs before the peak discharge but the time differences are rather small (up to 1 day). Moreover, the trends in the transport of suspended sediments in Slovenian streams are mostly negative (all statistically significant trends are negative). Reasons for this can be: closing of mines or foresterisation (abandoning of farming due to urbanisation). Application of the WATEM/SEDEM model showed that sediment delivery ratio decreases with increasing catchment area. Moreover, copula functions were used for multivariate flood frequency analysis where peak discharge, hydrograph volume and hydrograph duration were considered in the analysis. Moreover, copula functions were also used to analyse suspended sediment data and for the estimation of the suspended sediment values based on the measured discharge and rainfall values.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorici doc. dr. Mojci Šraj za pomoč in vse napotke pri izdelavi disertacije. Pri pridobivanju terenskih podatkov in raziskovalnem delu so aktivno sodelovali tudi ostali člani Katedre za splošno hidrotehniko (KSH), kjer moram posebej izpostaviti doc. dr. Simona Rusjana in Mateja Sečnika, za kar se jim zahvaljujem.

Del raziskav in terenskih meritev je potekal v okviru EU raziskovalnega projekta SedAlp, ki je financiran preko Alpine Space programa in raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS. Za terensko delo in obdelavo podatkov v okviru prej omenjenega projekta se zahvaljujem tudi članom Katedre za kartografijo, fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje (KKFDZ), še posebej asist. dr. Dejanu Grigillu.

Za pomoč pri izpeljavi nekaterih enačb bi se zahvalil tudi izr. prof. dr. Marjeti Kramar Fijavž.

Prav tako se zahvaljujem Agenciji RS za okolje za posredovane podatke.

Moj doktorski študij je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS.

Zahvalil bi se tudi partnerki, družini in prijateljem, ki so mi v času študija stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
LIST OF TABLES	XI
LIST OF FIGURES	XII
KAZALO PRILOG	XIV
1 UVOD	1
1.1 Opis problematike in relevantnost problema	1
1.2 Hipoteze	2
1.3 Cilji	3
1.4 Struktura doktorske disertacije	3
2 PREGLED LITERATURE	4
2.1 Opis procesov sproščanja, premeščanja in odplavljanja zemljin ter povezanih hidroloških procesov	4
2.1.1 Procesi sproščanja, premeščanja in odlaganja	5
2.1.2 Padavine in površinski odtok	8
2.2 Merske metode	10
2.2.1 Meritve padavin	10
2.2.2 Meritve pretokov	11
2.2.3 Meritve fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi	13
2.2.4 Meritve erozijskih procesov	15
3 METODE DELA	17
3.1 Opazovani procesi in uporabljane merske metode	17
3.2 Opis obravnavanih porečij	17
3.2.1 Eksperimentalni porečji Kuzlovec in Mačkov graben	17
3.2.2 Porečja, kjer se meritve izvajajo v okviru državnega hidrološkega monitoringa	19
3.3 Statistično-matematične metode	21
3.3.1 Sezonskost ter trendi hidroloških spremenljivk	21
3.3.2 Metoda letnih maksimumov ter metoda vrednosti nad izbranim pragom	22
3.3.3 Funkcije kopula	22
3.4 Modeliranje erozije tal	24
3.4.1 V Sloveniji pogosto uporabljene metode za modeliranje erozije tal	24
3.4.2 Model WATEM/SEDEM	25

4	REZULTATI IN RAZPRAVA	27
4.1	Rezultati meritev na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice	27
4.1.1	Rezultati meritev padavin, pretokov in fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi	27
4.1.2	Rezultati meritev erozijskih procesov	31
4.2	Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi	35
4.2.1	Povezava med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih	35
4.2.2	Trendi v obravnavanih hidroloških spremenljivkah	36
4.2.3	Sezonske značilnosti opazovanih hidroloških procesov	37
4.3	Rezultati modeliranja erozije tal	38
4.3.1	Masne bilance fluvialno premeščenih suspendiranih snovi	38
4.3.2	Potencialno sproščanje	38
4.3.3	Koeficient odplavljanja	40
4.4	Uporaba funkcij kopula	40
4.4.1	Rezultati multivariatnih verjetnostnih analiz visokovodnih valov	41
4.4.2	Rezultati multivariatnih analiz konic pretokov, volumnov valov ter koncentracij suspendiranih snovi	41
4.4.3	Rezultati ocenjevanja suspendiranih snovi z uporabo kopol	42
5	SKLEPI	44
6	POVZETEK	46
7	SUMMARY	48
VIRI		50

KAZALO PREGLEDNIC

2.1	Pregled merilnih metod za meritve suspendiranih snovi (povzeto po Wren in sod. (2000); Mikoš (2012b))	14
3.1	Opis šifer pedoloških kartografskih enot uporabljenih v legendi slike 3.3	20
3.2	Opis šifer pokrovnosti zemljišč uporabljenih v legendi slike 3.4 in deleži površin posameznih pokrovnosti tal	20
4.1	Rezultati testa Mann-Kendall s pripadajočimi stopnjami značilnosti za časovne serije letnih maksimumov koncentracij suspendiranih snovi (<i>SSC</i>) (povzeto po Bezak in sod. (2015c))	37
4.2	Prikaz sezonskih maksimumov koncentracij suspendiranih snovi (povzeto po Bezak in sod. (2015c))	38
4.3	Prikaz nekaterih osnovnih značilnosti obravnavanih postaj (povzeto po Bezak in sod. (2015c))	39

KAZALO SLIK

2.1	Shematski prikaz prepletanja vodnega in erozijsko-sedimentacijskega kroga	4
2.2	Grafični prikaz interakcije med procesi sproščanja, premeščanja ter odlaganja na ravninskem ter hribovitem območju	6
2.3	Nekatere oblike erozije tal	7
2.4	Prikaz različnih vrst padavinskega odtoka (povzeto po Knighton (1998); Rusjan (2008))	10
2.5	Prikaz merske opreme za točkovne meritve padavin (foto: Nejc Bezak)	12
2.6	Prikaz opreme za meritve pretokov in motnosti na porečju Kuzlovec (povzeto po Bezak in sod. (2013b))	13
2.7	Prikaz opreme za meritve erozije na nivoju pobočja (foto: Nejc Bezak)	15
3.1	Digitalni model višin porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor	18
3.2	Geološka karta porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor	18
3.3	Pedološke kartografske enote (PKE) porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor	19
3.4	CLC Corine pokrovnost zemljišč porečja Gradaščice	19
3.5	Prikaz grafičnih testov za preverjanje ustreznosti določenih kopul	23
3.6	Določitev povratne dobe OR za primer hkratne analize treh spremenljivk z uporabo Gumbel-Hougaard kopule (SSC =koncentracije suspendiranih snovi; Q =konice pretokov)	24
4.1	Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec I	27
4.2	Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec II	28
4.3	Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec III	29
4.4	Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor I (porečje Gradaščice)	29
4.5	Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor II (porečje Gradaščice)	30
4.6	Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor III (porečje Gradaščice)	31
4.7	Meritve intenzitete padavin in vsote padavin [mm/h in mm] z disdrometrom	32
4.8	Meritve padavin [mm] z uporabo meteorološkega radarja (4-5 avgust 2014)	32
4.9	Posledice ekstremnih meteoroloških razmer v noči s 4. na 5. avgust 2014 (foto: Matej Sečnik)	33
4.10	Prikaz razmer na območju Kuzlovca pred in po ekstremnem padavinskem dogodku (foto: Mojca Kogoj)	33
4.11	Prikaz višinskih razlik [m] med digitalnim modelom reliefa posnetim aprila 2013 in avgusta 2014	34
4.12	Histogram števila celic glede na erozijo (negativne vrednosti) ali odlaganje sedimentov (pozitivne vrednosti)	34
4.13	Povprečne vrednosti časovnega zamika med konico koncentracij suspendiranih snovi in konico pretoka (povzeto po Bezak in sod. (2015c))	35
4.14	Razponi parametrov umerjenega modela WATEM/SEDEM z uporabo orodij PEST (povzeto po Bezak in sod. (2015d))	40
4.15	Povezava med povratnimi dobami (OR in AND) in ocenjenimi vrednostmi spremenljivk (povzeto po Šraj in sod. (2015))	41

4.16 Porazdelitev ocenjenih <i>SSL</i> vrednosti in 50 % intervalov zaupanja za štiri dogodke, ki so se zgodili v različnih letnih časih	42
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LIST OF TABLES

2.1	Overview of suspended sediment measuring techniques (adapted after Wren in sod. (2000); Mikoš (2012b))	14
3.1	Description of pedological cartographic unit codes used in the legend of figure 3.3	20
3.2	Description of CLC Corine land cover codes used in the legend of figure 3.4 and percenteges of land-use types	20
4.1	The Mann-Kendall test results with the corresponding significance levels for the annual maximum sample of the suspended sediment concentration (<i>SSC</i>) values (adapted after Bezak in sod. (2015c))	37
4.2	Presentation of seasons with the highest suspended sediment concentration values (adapted after Bezak in sod. (2015c))	38
4.3	Basic properties of the selected gauging stations (adapted after Bezak in sod. (2015c))	39

LIST OF FIGURES

2.1	Diagram of interaction between water and erosion-sedimentation cycles	4
2.2	Graphical presentation of interaction among erosion, transport and deposition in the lowland and hillslope areas	6
2.3	Some soil erosion types	7
2.4	Graphical presentation of different rainfall runoff (adapted after Knighton (1998); Rusjan (2008))	10
2.5	Measuring equipment for the precipitation measurements at specific point (photo: Nejc Bezak)	12
2.6	Equipment for measuring water level and turbidity in the Kuzlovec catchment (adapted after Bezak in sod. (2013b))	13
2.7	Equipment for measuring soil erosion at the slope scale (photo: Nejc Bezak)	15
3.1	Digital elevation model of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station	18
3.2	Geological map of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station	18
3.3	Pedological cartographic units (PKE) of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station	19
3.4	CLC Corine land cover map of the Gradaščica catchment	19
3.5	Example of grafical goodness-of-fit test for different copula functions	23
3.6	Determination of the OR return period for the trivariate case using the Gumbel-Hougaard copula (SSC =suspended sediment concentration; Q =peak discharge)	24
4.1	Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment I	27
4.2	Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment II	28
4.3	Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment III	29
4.4	Discharge [m^3/s] and suspended sediment measurements [mg/l] at the Dvor gauging station I (Gradaščica catchment)	29
4.5	Discharge [m^3/s] and suspended sediment [mg/l] measurements at the Dvor gauging station II (Gradaščica catchment)	30
4.6	Discharge [m^3/s] and suspended sediment [mg/l] measurements at the Dvor gauging station III (Gradaščica catchment)	31
4.7	Measurement of rainfall intensity and accumulated rainfall with disdrometer [mm/h in mm]	32
4.8	Rainfall radar measurements [mm] (4-5 August 2014)	32
4.9	Consequences of the extreme meteorological conditions on the night from 4th to 5th of August 2014 (photo: Matej Sečnik)	33
4.10	Situation in the Kuzlovec torrent before and after the extreme rainfall event (photo: Mojca Kogoj)	33
4.11	Difference [m] between digital terrain model from April 2013 and August 2014	34
4.12	Histogram showing number of cells (y-axis) with positive or negative DoD values (x-axis)	34
4.13	Average lag values between maximum suspended sediment concentration values and peak discharge values (adapted from Bezak in sod. (2015c))	35
4.14	Parameter ranges for the calibrated WATEM/SEDEM model parameters, which were determined using the automatic parameter estimation procedure (PEST) (adapted from Bezak in sod. (2015d))	40
4.15	Joint return period values for OR and AND cases for the analysed pairs (adapted from Šraj in sod. (2015))	41

4.16 Distribution of estimated <i>SSL</i> values and 50 % confidence intervals for four events, which happened in different seasons	42
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

KAZALO PRILOG

- **PRILOGA A:** Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis
- **PRILOGA B:** Trivariate Frequency Analyses of Peak Discharge, Hydrograph Volume and Suspended Sediment Concentration Data Using Copulas
- **PRILOGA C:** Flood frequency analyses, statistical trends and seasonality analyses of discharge data: a case study of the Litija station on the Sava River
- **PRILOGA D:** Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers
- **PRILOGA E:** Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River
- **PRILOGA F:** Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure
- **PRILOGA G:** Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov
- **PRILOGA H:** Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben
- **PRILOGA I:** Estimation of suspended sediment loads using copula function

1 UVOD

1.1 Opis problematike in relevantnost problema

Suspendirane snovi so pomemben hidrološki dejavnik, ki vplivajo na ekološke razmere v vodotokih, in so lahko pokazatelj razvitosti erozijskih procesov v zaledju (Bezak in sod., 2015c; Bilotta in Brazier, 2008; Newcombe in Macdonald, 1991; Trambly in sod., 2010). Primer negativnega vpliva sedimentov na ekološke razmere v vodnem okolju predstavlja premeščanje sedimentov, onesnaženih z živim srebrom po reki Soči v Tržaški zaliv (Petkovšek, 2002; Rajar in sod., 2007). Na tem mestu je treba poudariti, da sedimenti ne povzročajo le negativnega vpliva na vodno okolje, kar je večinoma posledica človeških dejavnosti, temveč gre za naravni pojav, ki ima tudi pozitiven vpliv. Prav tako je pomembno poznavanje in razumevanje medsebojne interakcije med sedimenti ter številnimi hidrotehničnimi objekti. V Sloveniji je bila v zadnjem desetletju večina študij o sedimentih narejenih v povezavi s hidroelektrarnami na reki Savi (GEATEH, 2010), določene analize pa so bile izvedene tudi na drugih vodotokih (Dolar, 2014). Tako je bilo npr. ugotovljeno, da lahko transport sedimentov povzroči poškodbe na betonskih konstrukcijah vodnih zgradb, kar lahko pomeni povečanje obratovalnih stroškov ter drage sanacijske ukrepe (Kryžanowski in sod., 2012). Z vidika dobrega ekološkega in kemijskega stanja vodnih teles, ki je eden izmed ciljev okvirne direktive Evropske unije o vodah (Evropski parlament in Svet EU, 2000), pa je pomemben vpliv hidrotehničnih objektov na transport sedimentov (Bogen in Bønsnes, 2001; GEATEH, 2010; Mikoš, 2000). Kljub temu, da se količine premeščenih sedimentov v svetovnem merilu nekoliko zmanjšujejo (Walling in Fang, 2003) in da je tudi v Sloveniji prisoten negativen trend v izmerjenih koncentracijah suspendiranih snovi na določenih vodotokih (Bezak in sod., 2015c), gre še vedno za pomemben dejavnik, katerega je potrebno obravnavati celostno, torej na nivoju porečja, ki velikokrat presega državne meje in v teh primerih je potrebno vzpostaviti mednarodno sodelovanje (Babić-Mladenović in sod., 2013; SedAlp, 2015). Eden izmed predpogojev za nadgradnjo razumevanja o fluvialnem premeščanju suspendiranih snovi je zvezno spremljanje te hidrološke spremenljivke (Mikoš, 2012c; Bezak in sod., 2013a). Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) je meritve koncentracij suspendiranih snovi izvajala od sredine 20. stoletja v okviru hidrološkega monitoringa, v letu 2012 je prišlo do začasne prekinitve meritev, ki pa se bodo nadaljevale v okviru projekta BOBER (Boljše Opazovanje za Boljše Ekološke Rešitve), predvidoma v letu 2015 (Bezak in sod., 2013a, 2015c; Ulaga, 2005, 2006). Mikoš (2012c) je naredil pregled zakonodajne podlage za izvajanje državnega hidrološkega monitoringa, ki ga izvaja ARSO: Zakon o varstvu okolja (Ur. l. RS, 41/04), Zakon o vodah (Ur. l. RS, 67/02), Zakon o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami (Ur. l. RS, 64/94) ter Uredba o stanju površinskih voda (Ur. l. RS, 14/09).

Za nadgradnjo znanja o fluvialnem premeščanju suspendiranih snovi v tekočih vodah pa so izrednega pomena tudi podatki pridobljeni na eksperimentalnih porečjih, kjer gre za opazovanja, ki ne potekajo v sklopu državnega hidrološkega monitoringa. Na eksperimentalnih porečjih se ob dogodkih različnih intenzitet, večinoma z visoko frekvenco vzorčenja, izvajajo meritve več hidroloških spremenljivk, kot so npr. padavine, pretoki, vsebnost suspendiranega materiala (Bezak in sod., 2013b; Brocca in sod., 2011; Lenzi in sod., 1999; Šraj in sod., 2008b). Prednost sočasnih meritev prej omenjenih spremenljivk na manjšem območju je predvsem, da lahko ustrezno ovrednotimo povezave med opazovanimi hidrološkimi procesi. V Evropi so se prva eksperimentalna porečja pojavila že kmalu po letu 1900 (Warmerdam in Stricker, 2010), v Sloveniji pa je bilo porečje reke Reke eno izmed prvih takšnih območij (Brilly in sod., 2005; Šraj in sod., 2008b). Kasneje so se meritve npr. izvajale še na eksperimentalnem porečju reke Dragonje ter Gradaščice z Glinščico (Brilly in sod., 2005; Šraj in sod., 2008b). Trenutno je aktualno predvsem porečje reke Gradaščice in nekaterih hudourniških območij v povirju tega porečja (Bezak in sod., 2013b). Zaradi tega je bilo porečje Gradaščice izbrano za izvajanje terenskih meritev v okviru doktorske disertacije.

Podatki, pridobljeni z meritvami na eksperimentalnih porečjih ter v okviru državnih hidroloških monitoringov, se lahko analizirajo in preučijo z uporabo statistično-matematičnih metod ter modelov, s katerimi lahko modeliramo okoljske procese (npr. hidrološki, hidravlični modeli, modeli, s katerimi lahko ovrednotimo erozijo tal). V zadnjem desetletju se v hidrološki praksi vse pogosteje uporabljajo funkcije kopula (*ang.* copula) (Bezak in sod., 2014a), ki so že bile uspešno uporabljene za modeliranje številnih naravnih procesov, kjer hkrati nastopa več medsebojno bolj ali manj odvisnih spremenljivk (Bezak in sod., 2014b; Genest in Favre, 2007; Grimaldi in Sernaldi, 2006; Salvadori in sod., 2007; Šraj in sod., 2015). Na eksperimentalnih porečjih se lahko opazujejo tudi procesi erozije tal (Zorn, 2009), ki je neposredno povezana s fluvialnim premeščanjem suspendiranih snovi. Razmerje med prej omenjenima procesoma (premeščanje rinjenih ter lebdečih plavin ter erozijskimi procesi) lahko zajamemo s koeficientom odplavljanja (Ferro in Minacapilli, 1995; Lu in sod., 2006; Walling, 1983). Meritve erozije tal so precej redkejše kot meritve transporta suspendiranih snovi, še posebej na nivoju porečja, saj se meritve erozije tal zaradi vplivov vode, večinoma izvajajo ali na nivoju erozijskih polj velikosti nekaj kvadratnih metrov (Zorn, 2009) ali na nivoju pobočja (Malvar in sod., 2011), zato je za oceno erozije tal potrebno uporabiti različne modele. Merritt in sod. (2003) je naredil pregled obstoječih modelov za vrednotenje erozije tal, ki jih lahko razdelimo v tri glavne skupine: empirični oziroma pol-empirični modeli (npr. USLE, RUSLE), konceptualni modeli (npr. HSPF, LASCAM) ter modeli, ki opisujejo dejanske fizikalne procese, ki se odvijajo v naravnem okolju (npr. LISEM, TOPOG, PESERA). Nadalje je Petkovšek (2000) naredil pregled procesno utemeljenih metod za modeliranje erozije tal. Modeli različnih kompleksnosti, s katerimi lahko modeliramo okoljske procese, imajo različno število parametrov, ki vplivajo na izračune in jih je potrebno umeriti glede na dejanske podatke, saj lahko le tako zmanjšamo negotovost v končnih izračunih oziroma modelnih napovedih.

Podatki, pridobljeni v okviru državnega hidrološkega monitoringa in z meritvami na eksperimentalnih porečjih, se lahko uporabijo kot vhodni parameter različnih okoljskih modelov. Prav tako lahko prej omenjene podatke obdelamo z uporabo statistično-matematičnih orodij. Na ta način je možno nadgraditi znanje o fluvialnem premeščanju suspendiranih snovi ter povezanosti z drugimi hidrološkimi procesi kot so: padavine, prestrezanje padavin, površinski in podpovršinski odtok, evapotranspiracija. Pridobljeno znanje se lahko uporabi pri zagotavljanju dobrega ekološkega stanja vodnih teles, pri načrtovanju hidrotehničnih objektov in izrabi vodne energije ter zmanjševanju ogroženosti zaradi erozijskih procesov.

1.2 Hipoteze

Na podlagi predstavljene problematike (poglavje 1.1) so bile oblikovane naslednje hipoteze:

- hidrometeorološki pojavi velikih intenzitet (močne lokalne padavine) imajo nadpovprečen vpliv na vrednosti koncentracij suspendiranih snovi, ki jih vodotoki premeščajo ter maksimalne koncentracije suspendiranih snovi večinoma nastopijo pred konico poplavnega vala (nastopom maksimalnega pretoka);
- koeficient odplavljanja, ki predstavlja razmerje med dejanskimi izmerjenimi količinami lebdečih plavin (ocenjene letne količine fluvialno premeščenih suspendiranih snovi), in med potencialnimi letnimi količinami erodiranega materiala, določenega z uporabo empiričnega modela erozije tal (npr. USLE, RUSLE), je odvisen od velikosti porečja;
- z uporabo funkcij kopula lahko hkrati analiziramo vrednosti konic pretokov, volumne visokovodnih valov ter koncentracije suspendiranih snovi.

Razumevanje povezave med ekstremnimi meteorološkimi dogodki in procesi transporta sedimentov je prav tako pomembno z vidika učinkovitega načrtovanja hidrološkega monitoringa. V

primeru, da se meritve koncentracij suspendiranih snovi ne izvajajo zvezno, lahko le z občasnimi meritvami pred oziroma po nastopu konice pretoka, napačno določimo maksimalne količine premeščenih suspendiranih snovi. Vrednotenje razmerja med erozijo tal ter količinami lebdečih plavin nam omogoča določiti kritična območja v porečju, kjer se intenzivno odvijajo erozijski procesi. Uporaba funkcij kopula na podatkih o pretokih ter koncentracijah suspendiranih snovi pa do sedaj, po nam znanih podatkih, še ni bila izvedena.

1.3 Cilji

V okviru doktorske disertacije bomo podrobneje obravnavali teme, ki so prikazane v poglavjih 1.1 ter 1.2. Cilj disertacije je nadgraditi znanje o hidroloških procesih v porečjih, kjer se fluvialno premeščanje suspendiranih snovi dogaja ob hidrometeoroloških pojavih različnih magnitud, predvsem pa nas bodo zanimali ekstremni pojavi. Raziskali bomo sezonski vpliv na obravnavane hidrološke procese (tj. suspendirane snovi, pretoke), ugotavljali prisotnost trendov v analiziranih časovnih serijah in analizirali časovni odziv porečja ob ekstremnih hidrometeoroloških pojavih. Zanimalo nas bo, kakšna je časovna dinamika pri fluvialnem premeščanju suspendiranih snovi, pretokih in intenziteti padavin ter kako so ti procesi medsebojno povezani. Na podlagi podatkov o koncentracijah suspendiranih snovi (tj. meritve izvedene na eksperimentalnih porečjih ter v okviru državnega hidrološkega monitoringa) bomo poskušali določiti okvirne vrednosti masnih bilanc premeščenih lebdečih plavin v izbranem časovnem obdobju. Te vrednosti bomo primerjali z rezultati empiričnega modela za ocenjevanje potencialnega letnega sproščanja drobnozrnatih zemljin kot glavnega razpršenega izvora suspendiranih snovi, kjer bomo uporabili model WATEM/SEDEM. Podatke o pretokih in koncentracijah suspendiranih snovi bomo analizirali z uporabo sodobnih statistično-matematičnih metod. Izvedli bomo multivariatne verjetnostne analize z uporabo funkcij kopula, ki omogočajo hkratno upoštevanje dveh ali več v naravi bolj ali manj odvisnih hidroloških spremenljivk. Prikazane bodo enačbe uporabljenih statistično-matematičnih orodij, osnovne zakonitosti delovanja izbranih okoljskih modelov ter metode, ki se uporabljajo za meritve suspendiranih snovi v vodotokih. Rezultate meritev, analiz ter modeliranja bomo primerjali z ugotovitvami drugih raziskovalcev.

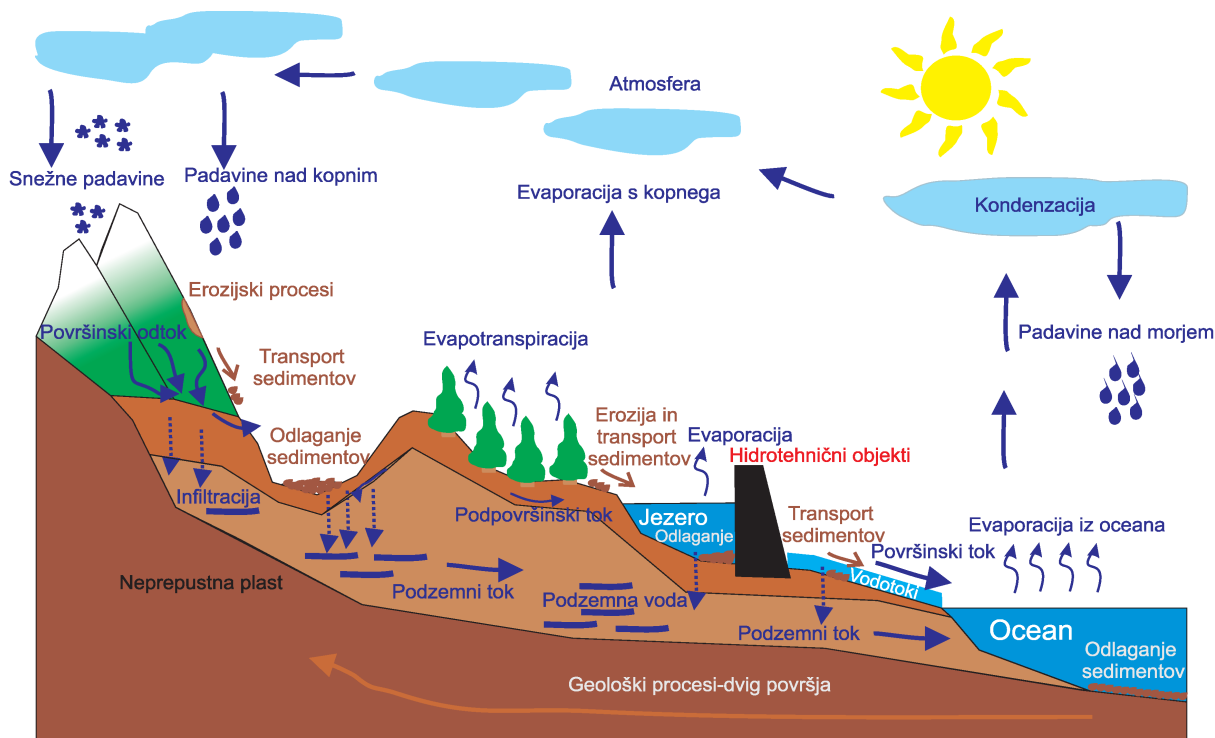
1.4 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija je sestavljena iz petih glavnih delov. Uvodnemu poglavju (poglavje 1) sledi poglavje imenovano pregled literature (poglavje 2), kjer so opisani številni procesi, ki sestavljajo vodni ter erozijsko-sedimentacijski krog, prikazane so merske metode, s katerimi lahko opazujemo te procese. Nadalje sledi poglavje metode, kjer je narejen povzetek uporabljenih metod, predstavljena so obravnavana porečja, opisana so uporabljena statistično-matematična orodja ter modeli za vrednotenje erozije tal (poglavje 3). Sledi del, kjer so prikazani rezultati, ki so v obliki razprave povezani z ugotovitvami drugih avtorjev (poglavje 4). V tem poglavju so prikazani rezultati meritev, analiz povezanosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi (pretoki in padavinami), modeliranja erozije tal ter primeri aplikacij funkcij kopula na hidroloških podatkih. Razprava je usmerjena predvsem na mednarodno umestitev rezultatov. Sledi zaključno poglavje (poglavje 5), kjer so podani odgovori o tem ali lahko delovne hipoteze zavrnilo ali sprejmemo, povzeti so bistveni zaključki ter nekatere usmeritve za nadaljnje delo. Celotna vsebina disertacije se prepleta z vsebino člankov, ki so dodani kot priloge k doktorski disertaciji (priloga A, priloga B, priloga C, priloga D, priloga E, priloga F, priloga G, priloga H, priloga I). Povedano drugače, disertacija je strukturirana v obliki monografije, kjer pa se velik del vsebine nahaja v priloženih člankih, zato ima besedilo v posameznih poglavjih večinoma vlogo veznega in povezovalnega besedila.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Opis procesov sproščanja, premeščanja in odplavljanja zemljin ter povezanih hidroloških procesov

Na Zemlji se voda nahaja v različnih agregatnih stanjih, poleg tega je Zemlja edini planet v solarnem sistemu, kjer lahko najdemo vodo v tekočem agregatnem stanju, vsaj v večjih količinah (Brilly in Šraj, 2005). Prav voda oziroma kroženje vode je eden izmed gradnikov življenja na planetu Zemlja in brez nje življenje, v obliki kot ga poznamo danes, ne bi bilo mogoče. Po drugi strani pa kroženje vode v vodnem oziroma hidrološkem krogu povzroča težave v obliki poplav, ki lahko povzročijo smrtne žrtve ter veliko gmotno škodo. Prav tako je gibanje vode eden od kontrolnih mehanizmov (*ang.* control mechanism) erozijskih procesov. Slika 2.1 prikazuje prepletanje oziroma interakcijo med hidrološkim ter erozijsko-sedimentacijskim krogom, pri tem pa je potrebno poudariti, da za vse procese prikazane na sliki 2.1, ni značilna enaka dinamika, saj je npr. geološki dvig površja (*ang.* uplift) izrazito počasnejši proces kot površinski odtok (*ang.* surface flow) ali izhlapevanje oziroma evaporacija (*ang.* evaporation). Na sliki 2.1 so prikazani naravni procesi, na katere lahko vplivajo tudi človeške dejavnosti, ki lahko določene procese pospešijo ali upočasnijo. Tako lahko npr. intenzivna sečnja gozdov pospeši erozijske procese, izgradnja prodnih zadrževalnikov prekine premeščanje sedimentov, gradnja na poplavnih območjih vpliva na tok površinskih voda, itd. V naslednjih podpoglavjih (poglavji 2.1.1 in 2.1.2) so nekoliko podrobneje opisani okoljski procesi obravnavani v doktorski disertaciji.



Slika 2.1: Shematski prikaz prepletanja vodnega in erozijsko-sedimentacijskega kroga
Figure 2.1: Diagram of interaction between water and erosion-sedimentation cycles

2.1.1 Procesi sproščanja, premeščanja in odlaganja

Slika 2.2 prikazuje povezanost procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja sedimentov. Pri tem so prikazani procesi, ki so bili najizrazitejši na porečju Gradaščice, kjer so se izvajale meritve različnih hidroloških spremenljivk in ki bo nekoliko podrobneje opisano v nadaljevanju (poglavje 3.2). Na sliki 2.2 je kompleksno površje Zemlje razdeljeno na ravninski ter hriboviti del. Podobne razdelitve se pogosto uporabljajo pri načrtovanju konceptualnih hidroloških modelov (Savenije, 2010). Za vsako območje so značilne edinstvene lastnosti (npr. raba tal, dinamika procesov, prevladujoči tip odtoka vode). Na hribovitem območju, kjer je prevladujoča raba tal gozd, večinoma prevladujejo procesi sproščanja, kot so erozija in veliki masni premiki (npr. plazovi), ki lahko pogosto prispevajo velik delež erozijskega materiala (Mikoš in sod., 2006). Ta material se večinoma zaradi površinskega odtekanja vode premešča dolvodno, del materiala se odloži v lokalnih depresijah (*ang.* local depression), preostanek se v obliki lebdečih (*ang.* suspended sediments) ter rinjenih (*ang.* bed load) plavin premešča v ravninsko območje, kjer večinoma prevladujejo kmetijska zemljišča ter travniki. Na tem delu prevladujejo procesi odlaganja, saj gre za teren z manjšim naklonom in posledično manjšo energijo vodnega toka. Glavni vir sedimentov v ravninskem območju je večinoma erozija brežin, ki je še posebej izrazita ob ekstremnih hidrometeoroloških dogodkih.

Procese preoblikovanja (zniževanja) zemeljskega površja lahko v grobem razdelimo na:

- procesi preperevanja (*ang.* weathering);
- erozija tal (*ang.* soil erosion);
- velika masna gibanja (*ang.* mass movements).

Procesi preperevanja vključujejo biološko, fizikalno in kemično preperevanje (Petkovšek, 2002; Pintar in Mikoš, 1983), med masne premike lahko štejemo npr. globoke plazove, plitve plazove, podore. Skaberne (2000) je podal pregled težnostnih premikanj na pobočjih. Erozija tal (*ang.* soil erosion) oziroma erozija prsti, kjer je prst vrhnja plast litosfere (pedosfera) debeline nekaj 10 centimetrov (Petan, 2010; Zorn in Komac, 2005), je prav tako eden izmed pomembnejših procesov, ki preoblikujejo zemeljsko površje. Na procese erozije tal med drugim vplivajo različne oblike padavin (npr. sneg, dež) in premiki zračnih mas (veter) (Petkovšek, 2002; Pintar in Mikoš, 1983). Glede na opisane procese je očitno, da se erozijski procesi intenzivno prepletajo s procesi kroženja vode (slika 2.1), saj pri eroziji tal in velikih masnih gibanjih nastopa voda v različnih agregatnih stanjih. Prav tako kroženje vode vpliva na procese preperevanja. Poleg kroženja vode ter gibanja zračnih mas (veter) ima pomemben vpliv na erozijske procese tudi težnost.

V Sloveniji se je v preteklosti več pozornosti posvečalo erozijskim procesom, saj se je velik del prebivalstva ukvarjal s kmetijstvom in prav ta gospodarska panoga je zaradi izgube rodovitnih tal najbolj ranljiva. S pogozdovanjem in opuščanjem kmetijstva se je zmanjševalo tudi število erozijskih študij (Petan, 2010). Po nekaterih ocenah se v Sloveniji letno sprosti med 4 in $6 \cdot 10^6$ m³ materiala, kar pomeni da se površje v povprečju zniža za 0,25 mm na leto (Mikoš in Zupanc, 2000; Zorn in Komac, 2005). Pri tem se je potrebno zavedati, da gre za povprečno oceno, kjer se količine sproščenih zemljin razlikujejo za različne pokrovnosti oziroma rabe tal (*ang.* land-use) (Mikoš in Zupanc, 2000; Petan, 2010). Na erozijske procese vplivajo: podnebne oziroma hidrološke značilnosti (npr. časovna in prostorska porazdelitev ekstremnih meteoroloških dogodkov), topografske značilnosti površja (npr. naklon površja, izbočenost, vbočenost), fizikalne lastnosti tal (npr. tekstura, struktura, delež organskih snovi), raba tal (npr. gozd, kmetijsko zemljišče) ter človeške dejavnosti (npr. pogozdovanje, intenzivno kmetijstvo) (Mikoš in Zupanc, 2000; Petan, 2010).



Slika 2.2: Grafični prikaz interakcije med procesi sproščanja, premeščanja ter odlaganja na ravninskem ter hribovitem območju

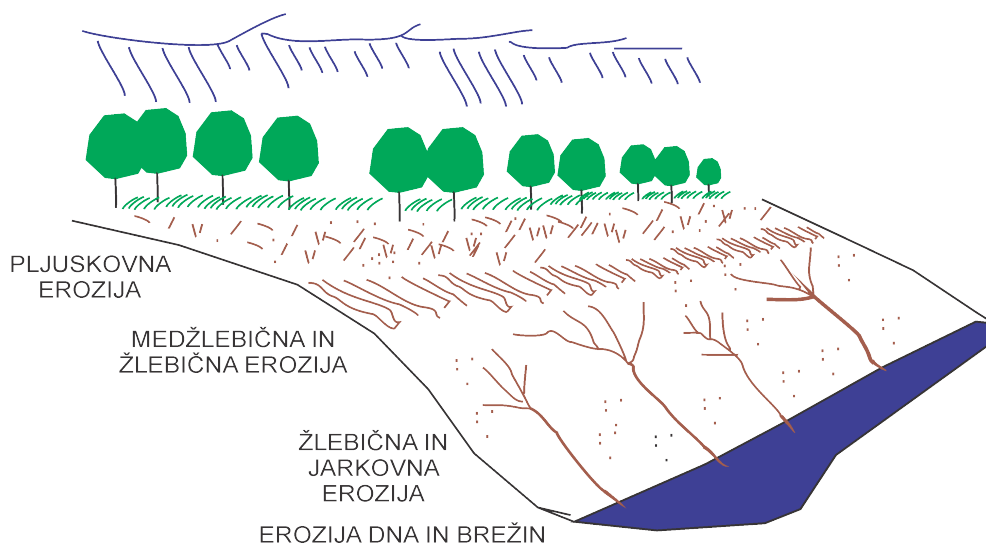
Figure 2.2: Graphical presentation of interaction among erosion, transport and deposition in the lowland and hillslope areas

V disertaciji se bomo osredotočili na erozijske procese, ki so posledica relativno razpršenega gibanja vode, in so prikazani na sliki 2.3 ter jih lahko razdelimo na (Mikoš in Zupanc, 2000):

- pljuskovna erozija (*ang.* splash erosion);
- medžlebična erozija (*ang.* interrill erosion);
- žlebična (*ang.* rill erosion);

- jarkovna (*ang.* gully erosion).

Pljuskovna erozija nastopi, ko dežne kaplje pridejo v stik s tlemi. Posamezni delci tal se lahko zaradi erozijske moči dežnih kapelj premaknejo tudi do 0,6 metra v višino ter 1,5 metra horizontalno od mesta pljuska dežne kaplje (Yerima in van Ranst, 2005). Pljuskovna erozija je v največji meri odvisna od intenzitete dežja, kinetične energije dežnih kapelj ter lastnosti tal (Petan, 2010; Petkovšek, 2002). Dokler se zaradi površinskega odtekanja vode ne izoblikujejo majhni potočki v obliki žlebičev, prevladuje medžlebična erozija, pri kateri še ne pride do združevanja površinskega toka v žlebiče (Mikoš in Zupanc, 2000; Yerima in van Ranst, 2005). Ko pa je prispevno območje dovolj veliko oziroma količina vode zadostna, se začnejo oblikovati žlebiči (Petkovšek, 2002). S stopnjevanjem koncentriranja vodnih tokov, ki je odvisna od dolžine pobočja (Rusjan in Mikoš, 2006), se začne postopoma pojavljati jarkovna erozija, kjer so tla razjedena tako globoko, da jih ne moremo izravnati z običajnimi orodji za kmetijsko obdelavo (Mikoš in Zupanc, 2000). Nekateri avtorji omenjajo še brazdno erozijo (*ang.* furrow erosion), ki je vmesna stopnja med žlebično ter jarkovno erozijo (Mikoš in Zupanc, 2000; Petan, 2010). Procesi pljuskovne, medžlebične ter žlebične erozije so površinski, medtem ko sta brazdna ter jarkovna erozija že procesa, ki povzročata globinsko erozijo (Mikoš in Zupanc, 2000; Petan, 2010).



Slika 2.3: Nekatere oblike erozije tal

Figure 2.3: Some soil erosion types

Petkovšek (2002) je zbral nekatere enačbe, s katerimi lahko modeliramo možno stopnjo sproščanja v žlebičih. Enačbe lahko razdelimo na tiste, ki temeljijo na parametrih, kot sta strižna napetost ali specifična moč toka, ter enačbe, ki upoštevajo turbulentna nihanja strižne napetosti. Za izračun premestitvene zmogljivosti je potrebno poznati vrednosti specifične moči vodnega toka (Petkovšek, 2002). Dejansko sproščanje v žlebičih je odvisno od trenutnega pretoka plavin, če je pretok velik, je na voljo manj energije za dodatno sproščanje (Petkovšek, 2002). V primeru, da je pretok plavin večji od premestitvene zmogljivosti, nastopi odlaganje, ki ga lahko izračunamo kot razliko pretoka plavin ter premestitvene zmogljivosti (Petkovšek, 2002).

Naslednja stopnja v erozijsko-sedimentacijskem krogu (slika 2.1) je premeščanje drobnozrnatih zemljin z zgornje plasti zemeljske površine (pedosfere) v kombinaciji z grobozrnatim erozijskim drobirjem po erozijskih jarkih in hudournikih v rečno mrežo (Mikoš, 2012a). V primeru, da se prej omenjeni material premešča po rečni strugi, ga lahko imenujemo plavine (*ang.* fluvial sediments) (Mikoš, 2012a; Rusjan in Mikoš, 2006). Plavine lahko v grobem razdelimo na:

- kalne snovi;

- lebdeče plavine;
- rinjene plavine.

Poleg tega vodotok premešča še raztopljene snovi, ki pa imajo pri preučevanju transporta plavin zanemarljiv prispevek (Mikoš, 2012a). Prodonosnost je izraz za dejanski transport rinjenih plavin [kg/s, t/leto, m³/leto], ki se premikajo po dnu ali poskakujejo v rečni tok (*ang.* saltation), ter izraz za prej opisan pojav (Mikoš, 2012a). Poskakovanje rinjenih plavin predstavlja prehod med premeščanjem rinjenih ter lebdečih plavin. Kalne snovi večinoma sestavljajo drobni sedimenti velikosti melja (premer zrn je med 0,002 in 0,06 mm) in gline (premer zrn je manjši od 0,002 mm), ki se v vodotokih večinoma premeščajo brez stika z rečnim dnom tudi ob običajnih hidroloških razmerah. Ob povišanih vodostajih imajo velik vpliv na kalnost tudi lebdeče plavine oziroma suspendirane snovi [mg/l, t/leto, m³/leto], kjer gre za nekoliko bolj grob material s prevladujočim deležem peska (premer zrn med 0,06 in 2 mm), ki zaradi turbulence lebdi v vodnem toku in ima pogosto enako hitrost kot vodni tok (Rusjan in Mikoš, 2006). Ti delci se ob običajnih oziroma podpovprečnih hidroloških razmerah lahko ponovno odložijo oziroma premikajo kot rinjene plavine (Mikoš, 2012a). Pri transportu sedimentov vzdolž rečne mreže sta pomembna tudi procesa rečnega obrusa (*ang.* fluvial abrasion), kjer gre za procese brušenja, glajenja, krušenja, ter rečno sortiranje kot posledica selektivnega premeščanja (*ang.* fluvial sorting), ki lahko poteka v različnih smereh (npr. vzdolžno, prečno, vertikalno) (Mikoš, 1994, 2012a). Drobni delci se lahko premeščajo tudi skozi različne plasti zgornjih delov litosfere, vendar so procesi podpovršinskega spiranja ter premeščanja v naravnih razmerah zanemarljivi (Grant in sod., 1996; Rusjan in Mikoš, 2006). Zapisati je potrebno še, da vodotok pogosto premešča plavje, največkrat leseno plavje (*ang.* wooden debris), ki pa ni predmet raziskave v tej disertaciji. Leseno plavje ima lahko velik vpliv na erozijske procese v strugi vodotoka, npr. oblikovanje lokalnih tolmunov in erozijskih zajed.

Za oceno premestitvene zmogljivosti vodnih tokov za rinjene plavine se lahko uporabijo različne empirične enačbe, ki so bile izpeljane na podlagi laboratorijskih eksperimentov in ob določenih predpostavkah. Verjetno ena izmed najpogosteje uporabljenih metod je enačba Meyer-Peter-Müller (Meyer-Peter in Müller, 1948), ki je bila izpeljana na podlagi poizkusov na Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Kasneje so bili na ETH Zürich eksperimenti izvedeni še pri nekaterih drugih pogojih, kot npr. večji nakloni laboratorijskega žleba (Smart in Jäggi, 1983; Rickenmann, 1991). Enačba Meyer-Peter-Müller je poleg nekaterih drugih enačb kot npr. enačba Ackers in White (1973) implementirana tudi v prosto dostopni program HEC-RAS (Gibson in sod., 2006), ki se pogosto uporablja za hidravlično modeliranje. Tudi nekatera druga programska orodja kot npr. MIKE modeli imajo vgrajene nekatere module (1D, 2D in 3D) za račun transporta sedimentov (MIKE, 2015). Nadalje lahko z uporabo enačbe Ackers in White (1973) določimo celotno premestitveno zmogljivost, torej tako prispevek lebdečih kot rinjenih plavin. Za modeliranje transporta rinjenih ter lebdečih plavin po rečni mreži so na razpolago tudi nekateri drugi modeli kot npr. STAND, SRH-1D, SRH-2D (Merritt in sod., 2003; Zeng in Beck, 2003; Ruark in sod., 2011; USDI, 2015).

Kot je razvidno iz slike 2.1, so za sklenitev erozijsko-sedimentacijskega kroga nujni še nekateri drugi geološki procesi kot je npr. geološki dvig, ki lahko na širšem območju Alp znaša tudi do 1 mm na leto, vendar so to ekstremni dvigi, ki so značilni zgolj za nekatera območja (Norton in sod., 2011).

2.1.2 Padavine in površinski odtok

Erozijsko-sedimentacijski krog je pogosto v interakciji z vodnim oziroma hidrološkim krogom (slika 2.1). Nastanek padavin, ki poteka v oblakih, je kompleksen proces, ki se odvija v atmosferi, kjer zračni tokovi premikajo oblake (ter oblačne delce) v horizontalni ter vertikalni smeri (Petan,

2010). Rakovec in Vrhovec (2000) podajata natančen opis nastanka padavin, kjer lahko ločimo dva glavna mehanizma, in sicer, koalescenca oziroma zlivanje kapljic ter rast ledenih kristalov na račun podhlajenih kapljic (Petan, 2010). Poenostavljeno pa do nastanka padavin pride, ko delci v oblakih zrastejo do takšne velikosti, da se zaradi teže izločijo v različnih oblikah padavin (padavinske kaplje ter padavinski snežni kristali) (Brilly in Šraj, 2005; Petan, 2010; Rakovec in Vrhovec, 2000). Padavine lahko razdelimo glede na izvor padavin, opazovanja pri tleh ter oblike gibanja zračnih mas, ki povzročajo padavine (Brilly in Šraj, 2005):

- orografske padavine;
- konvektivne padavine;
- ciklonske padavine.

Orografske padavine nastajajo ob dviganju zračnih mas zaradi trka le-teh s pobočji gorskih grebenov, konvektivne padavine se v Sloveniji večinoma pojavljajo v poletnem obdobju, zaradi lokalnega dvigovanja segrelih zračnih mas, kjer gre za t.i. poletne nevihte, ciklonske padavine pa lahko razdelimo na frontalne ter nefrontalne ciklonske padavine (Brilly in Šraj, 2005).

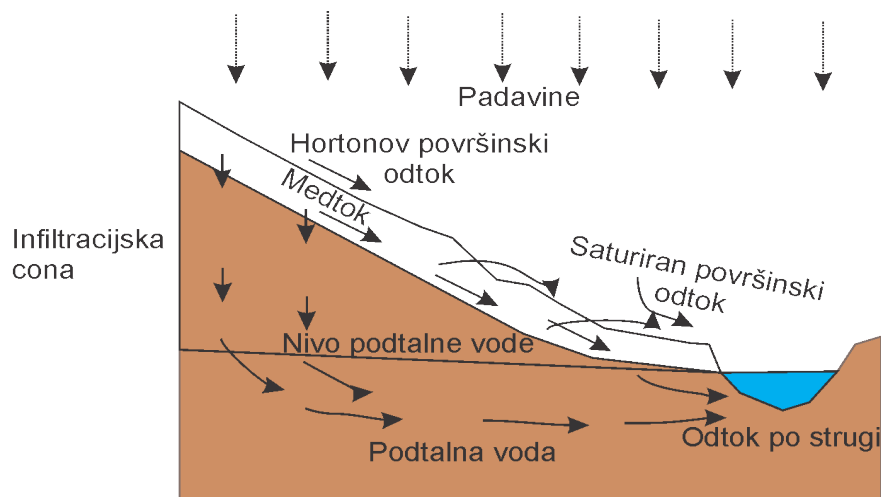
S hidrološkega vidika so pomembnejši procesi, ki se odvijajo, ko pridejo različne oblike padavin (dež, sneg, toča, sodra, rosa) v stik z zemeljskim površjem oziroma različnimi vrstami vegetacije. Pri tem je prestrežanje padavin pomemben proces, še posebej v državah kot je Slovenija, kjer gozd pokriva preko 60 % celotne površine. Ovington (1954) je ugotovil, da lahko količina prestreženih padavin znaša med 6 in 93 %. Za iglavce delež prestreženih padavin večinoma znaša med 20 in 40 %, listavci pa praviloma prestrežejo med 20 in 25 % padavin (Geiger in sod., 1995). V Sloveniji so se meritve prestreženih padavin v daljšem časovnem obdobju izvajale na porečju reke Dragonje, kjer je bilo ugotovljeno, da znaša povprečni delež letnih izhlapelih padavin 25 % za severno ter 28 % za južno raziskovalno pobočje porečja Dragonje (Šraj, 2003; Šraj in sod., 2008a). Na izhlapevanje prestreženih padavin med drugim vplivajo: temperatura zraka, gibanje zračnih mas (veter), časovno obdobje v letu, tip vegetacije oziroma pokrovnost tal (Šraj, 2003).

Preostanek padavin, ki ga vegetacija ne prestreže oziroma zgolj začasno zadrži, nato ob stiku s tlemi tvori padavinski odtok, ki ga lahko v grobem razdelimo na (Knighton, 1998; Rusjan, 2008):

- neposredni odtok po strugi;
- površinski odtok;
- infiltracijo.

Zgoraj omenjeni procesi skupaj prispevajo k celotni količini vode v izhodnem profilu določenega prispevnega območja. Prispevek posameznih komponent je odvisen od številnih dejavnikov, kot npr. intenziteta in trajanje padavinskega dogodka, pokrovnost tal in posledično delež prestreženih padavin, infiltracijska sposobnost tal, klimatske razmere (aridno ali humidno območje) (Rusjan, 2008). Slika 2.4 prikazuje različne poti stekanja padavinske vode.

Teorijo nastanka Hortonovega površinskega odtoka (*ang.* Horton overland flow) (slika 2.4) je leta 1933 podal Horton (Horton, 1933). Do površinskega odtoka padavinske vode pride, ko je intenziteta padavin večja od infiltracijske sposobnosti tal. V nasprotnem primeru do tvorbe površinskega odtoka ne pride in padavine v celoti pronicajo v tla (Rusjan, 2008). Infiltracijska sposobnost tal se med padavinskim dogodkom zmanjšuje in je odvisna od lokalnih razmer (Rusjan, 2008). Posledično do nastopa Hortonovega površinskega odtoka pride z določenim časovnim zamikom glede na začetek padavinske dogodka (Rusjan, 2008). Nadalje se Hortonov površinski



Slika 2.4: Prikaz različnih vrst padavinskega odtoka (povzeto po Knighton (1998); Rusjan (2008))

Figure 2.4: Graphical presentation of different rainfall runoff (adapted after Knighton (1998); Rusjan (2008))

odtok pogosto pojavi v manjših porečjih z manjšim deležem vegetacije, saj lahko ta zadrži in zakasni proces površinskega odtoka. Teorijo nastanka saturiranega oziroma zasičenega površinskega odtoka (*ang.* saturation overland flow) (slika 2.4) je predlagal Hewlett (1961). Po tej teoriji pride do površinskega odtoka v primeru, ko so tla že zasičena z vodo (dvig talne vode) zaradi predhodnih padavin. Ko nivo talne vode doseže površje se ob kombinaciji z dodatnimi padavinami tvori saturiran površinski odtok (Rusjan, 2008). Do pojava tega procesa ne prihaja zgolj v bližini vodotokov, kjer je višina podtalnice večinoma relativno visoka, temveč tudi na območjih, kjer je to pogojeno s primernimi topografskimi ter hidro-geološkimi pogoji (npr. konkavna pobočja) (Rusjan, 2008). Za razliko od Hortonovega površinskega odtoka se zasičen površinski odtok pogosteje pojavi na območjih z relativno gosto vegetacijo. Hortonov površinski odtok ter saturiran površinski odtok predstavljata dve teoriji formiranja površinskega odtoka, nekatere študije pa so pokazale, da je podpovršinski tok (*ang.* subsurface flow) lahko prevladujoči del odtoka padle vode (Rusjan, 2008). V grobem lahko podpovršinski tok razdelimo na plitev podpovršinski tok ter globlji tok podtalne vode (Rusjan, 2008). Voda, ki se infiltrira v tla, med pronicanjem doseže talni horizont skozi katerega se vertikalno ne more več infiltrirati (hidravlična prevodnost se večinoma zmanjšuje z večanjem globine), zato se začne voda lateralno gibati proti vodotoku (Rusjan, 2008). Razlika med medtokom (slika 2.4) in gibanjem podtalne vode je v večji hitrosti gibanja medtoka, ki se odvija v horizontih, ki so bližje površju. Zgoraj opisani procesi so pogosto zajeti v konceptualnih hidroloških modelih (npr. Savenije (2010); Seibert in Beven (2009); Seibert in Vis (2012)).

2.2 Merske metode

V naslednjih podpoglavjih bodo opisane nekatere merske metode, ki se lahko uporabljajo za meritve različnih procesov, ki sestavljajo vodni ter erozijsko-sedimentacijski krog (slika 2.1).

2.2.1 Meritve padavin

Merilne naprave za meritve padavin lahko v grobem razdelimo na tiste, ki omogočajo prostorski zajem podatkov (npr. meteorološki radar) ter ostale, s katerimi lahko izmerimo vrednosti padavin v izbrani točki, torej točkovne meritve. Glede na priročnik Svetovne meteorološke organizacije (WMO, 2008) lahko točkovne merilne instrumente razdelimo na ročne ter avtomatske

merilne naprave. Med ročne naprave lahko štejemo ombrometre ter totalizatorje. Ombrometer se uporablja za meritve padavin v krajših časovnih intervalih, kot je npr. dnevni časovni korak (npr. meritve se izvajajo vsak dan ob 7:00 zjutraj), medtem ko se totalizatorji uporabljajo za meritve padavin v daljših časovnih obdobjih (npr. mesečne meritve) (Brilly in Šraj, 2005). Med avtomatske merilce pa štejemo naslednje merilne naprave (WMO, 2008):

- meritve padavin s tehtanjem (*ang.* weight gauge);
- meritve padavin s prekucniki (*ang.* tipping bucket gauge);
- meritve padavin s plovcem (*ang.* float gauge).

Pri vseh zgoraj omenjenih napravah je verjetno najpomembnejši korak umerjanje (*ang.* calibration) merske opreme, poleg tega je med izvajanjem meritev potrebno zagotoviti ustrezno vzdrževanje opreme (WMO, 2008). WMO (2008) podaja tudi natančna navodila za postavitev merske opreme ter opis nekaterih najpogostejših pogrškov pri meritvah. Zgolj v primeru, da se meritve izvajajo v skladu s priporočili (WMO, 2008), lahko v pridobljene podatke zaupamo in jih uporabimo za nadaljnje analize ali hidrološke napovedi. Vsaka merska metoda ima pripadajočo natančnost, ki jo večinoma določi proizvajalec naprave, in jo je prav tako potrebno upoštevati. Slika 2.5 prikazuje nekatere merske naprave, s katerimi lahko merimo padavine. Na sliki 2.5 so prikazani Helmanov dežemer (ombrometer) (slika 2.5a), ki zahteva ročne odčitke padavin, prekucnik, ki avtomatično beleži vsak prekuc in posledično znano količino padavin (slika 2.5b) ter optični disdrometer, ki določi količino padavin na podlagi algoritma, ki upošteva velikost ter čas padanja kapljic skozi laserski žarek, ki poteka med sprejemno in oddajno glavo disdrometra (slika 2.5c). Pri slednji metodi gre za t.i. indirektno meritve padavin, kjer se lahko izmerjene vrednosti razlikujejo od količin padavin, izmerjenih s prekucniki ali ombrometri (Petan, 2010). Prednost disdrometrov pa je, da lahko z njimi določimo tudi nekatere druge značilnosti padavinskega dogodka (npr. kinetična energija padavin) (Petan, 2010). Več informacij o samem načinu delovanja optičnih disdrometrov je na voljo na spletni strani nekaterih proizvajalcev teh instrumentov: <http://www.thiesclima.com/disdrometer.html> ali <http://www.ott.com/en-us/products/meteorological-sensors/ott-parsivel2/>.

Uporaba satelitskih podatkov ali meteorološkega radarja omogoča prostorski zajem podatkov o padavinah. V Sloveniji se za namen meteorološke prognoze trenutno uporabljata dva meteorološka radarja, ki sta locirana na Lisci in Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem. Razvijajo se tudi druge metode zaznavanja padavin, kot npr. uporaba elektromagnetnih signalov obstoječih telekomunikacijskih omrežij (Overeem in sod., 2011). V svetovnem merilu se število točkovnih merilnikov padavin zmanjšuje, saj jih počasi nadomeščajo meteorološki radarji, vendar so podatki, pridobljeni s točkovnimi instrumenti izrednega pomena za določitev pravilne prostorske porazdeljenosti padavin na izbranem porečju (Bardossy in Pegram, 2013).

Večina izmed zgoraj omenjenih merskih instrumentov je namenjenih meritvam dežja, nekatere naprave pa se lahko uporabijo tudi za meritve snežnih padavin in rose. Predvsem snežne padavine imajo lahko v državah, kot je Slovenija, velik vpliv na letno bilanco padavin, zato je potrebno izbrati ustrezno mersko opremo, ki omogoča kvalitetne meritve te meteorološke spremenljivke. WMO (2008) podaja tudi pregled merske tehnike, s katero lahko merimo zgolj snežne padavine. Več informacij o merskih instrumentih, ki se uporabljajo za meritve padavin na eksperimentalnem porečju Gradaščice, je podanih v prilogi H.

2.2.2 Meritve pretokov

V hidrometriji, ki je veda o meritvah lastnosti vode, lahko izvajamo naslednje meritve (Brilly in Šraj, 2005):



Slika 2.5: Prikaz merske opreme za točkovne meritve padavin (foto: Nejc Bezak)
Figure 2.5: Measuring equipment for the precipitation measurements at specific point (photo: Nejc Bezak)

- meritve globin vode;
- meritve gladin vode;
- meritve hitrosti vode;
- meritve pretokov vode.

Z vidika vodne bilance v hidrološkem krogu so vsekakor najzanimivejše tiste meritve, na podlagi katerih lahko določimo vrednost pretoka v izbranem prečnem prerezu vodotoka. Za meritve pretokov v vodotokih se lahko uporabijo različne metode, kjer je podobno kot pri meritvah padavin potrebno izbrati metodo, ki je najustreznejša glede na terenske in hidrološke razmere. Turnipseed in Sauer (2010) podajata natančen opis nekaterih merskih instrumentov, s katerimi lahko določimo pretok vode. Poleg izbire ustreznega načina merjenja je potrebo za izvajanje meritev določiti tudi ustrezen merski prečni profil, ki mora izpolnjevati nekatere pogoje, kot so: v izbranem profilu ne prihaja do izrazitih erozijskih procesov oziroma odlaganja sedimentov, ob visokih vodostajih načeloma ne prihaja do preliivanja vode izven območja struge, prečni prerez mora biti dostopen, da lahko tudi ob visokovodnih razmerah izvedemo meritve. V grobem pa lahko meritve pretokov razdelimo tudi na neposredne (npr. volumetrična metoda, metoda z uporabo sledila), torej tiste, kjer določamo vrednost volumna v določenem časovnem intervalu, ter posredne, kjer pretok določimo na podlagi drugih parametrov vodnega toka (npr. merski objekti, določanje pretoka na podlagi meritev hitrosti in dimenzij prečnega prereza ali uporaba pretočne krivulje).

Na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice (poglavje 3.2.1) se vrednosti pretokov določajo na podlagi meritev gladin z uporabo tlačne sonde in pretočne krivulje. Za določitev pretočne krivulje (imenujemo jo lahko tudi Q-H krivulja), ki je funkcija, ki povezuje vrednost vodostaja in pretoka, se izvajajo tudi občasne meritve pretokov ali z uporabo Dopplerjevega merilca hitrosti Flow Tracker ADV (<http://www.sontek.com/productsdetail.php?FlowTracker-Handheld-ADV-1>) ali z uporabo metode, kjer se pretok določi na podlagi znane koncentracije sledila (<http://www.flow-tronic.com/en/products>). Več informacij o meritvah pretokov na eksperimentalnem porečju je podanih v prilogi H. V okviru dela na eksperimentalnem porečju je bila izdelana

tudi diplomska naloga, katere cilj je bil primerjava prej omenjenih metod določanja pretokov in kjer so prav tako podani nekateri opisi različnih instrumentov, ki jih lahko uporabimo za posredne ali neposredne meritve pretokov (Cvetko, 2013). Slika 2.6a prikazuje lokacijo zračne in vodne sonde (tlačni sondi), ki se uporabljata za posredne meritve pretokov, na eksperimentalnem porečju Kuzlovec.

V prilogi A pa je podan opis merskega instrumenta, ki se je uporabljal za meritve pretokov na vodomerni postaji Litija na reki Savi, ki je bila uporabljena za določene analize prikazane v tej disertaciji (priloga C).



(a) Lokacija vodne ter zračne sonde na porečju Kuzlovec



(b) Lokacija Hydrolab MS5 sonde na porečju Kuzlovec

Slika 2.6: Prikaz opreme za meritve pretokov in motnosti na porečju Kuzlovec (povzeto po Bezak in sod. (2013b))

Figure 2.6: Equipment for measuring water level and turbidity in the Kuzlovec catchment (adapted after Bezak in sod. (2013b))

2.2.3 Meritve fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi

Podobno kot pri meritvah pretokov in padavin lahko tudi za meritve koncentracij suspendiranih snovi uporabimo različne metode. Preglednica 2.1 prikazuje prednosti in slabosti nekaterih metod, ki jih lahko uporabimo za meritve rečnih sedimentov (Wren in sod., 2000; Mikoš, 2012b). Številne metode, prikazane v preglednici 2.1, so bile uporabljene tudi pri meritvah, ki so potekale v okviru projekta SedAlp (SedAlp, 2015).

V Sloveniji se meritve koncentracij suspendiranih snovi v okviru državnega hidrološkega monitoringa izvajajo že več kot 50 let (Ulaga, 2005, 2006; Bezak in sod., 2013a). Za meritve pa se je večinoma uporabljala metoda stekleničenja (preglednica 2.1), kjer je po meritvi vzorec potrebno še laboratorijsko obdelati, če želimo določiti koncentracije suspendirani snovi, ki jih vodotok premešča. Več informacij o meritvah koncentracij suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih je podanih v prilogi D in prilogi G.

V prilogi H in prilogi I je več informacij o meritvah fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi,

Preglednica 2.1: Pregled merilnih metod za meritve suspendiranih snovi (povzeto po Wren in sod. (2000); Mikoš (2012b))

Table 2.1: Overview of suspended sediment measuring techniques (adapted after Wren in sod. (2000); Mikoš (2012b))

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

ki poteka na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice, kjer se za meritve te hidrološke spremenljivke uporablja optična metoda merjenja (preglednica 2.1), za meritve se torej uporablja večparameterska sonda (<http://www.ott.com/en-us/products/water-quality/hydro-lab-ms5/>). Meritve koncentracij suspendiranih snovi so se od poletja 2013 do poletja 2014 izvajale na eks-

perimentalnem porečju Kuzlovec (priloga H) (Slika 2.6b), od jeseni 2014 pa se meritve izvajajo na vodomerni postaji Dvor (slika 3.1), kjer meritve pretokov v okviru državnega hidrološkega monitoringa izvaja ARSO.

2.2.4 Meritve erozijskih procesov

Meritve erozijskih procesov se večinoma izvajajo ali na nivoju erozijskih polj ali na nivoju pobočja (Petkovšek, 2002; Zorn, 2009; Petan, 2010; Prats in sod., 2013). Zorn (2009) je izvajal meritve erozije prsti v porečju reke Dragonje in preučeval vpliv rabe tal na erozijske procese. Zorn (2009) je podal tudi več informacij o postavitvi merske opreme. Robichaud in Brown (2002) podajata opis in lastnosti metode za meritve erozijskih procesov na nivoju pobočja, kjer je glavna prednost takšne merilne tehnike nizka cena in relativno preprosta aplikacija. Slika 2.7 prikazuje primer postavitve takšne opreme na eksperimentalnem porečju na Portugalskem (Prats in sod., 2013). Za meritve erozije tal se lahko uporabijo tudi erozijski žebliči, ki jih je nekoliko podrobneje opisal Petkovšek (2002).



(a) Meritve erozije na nivoju pobočja I



(b) Meritve erozije na nivoju pobočja II

Slika 2.7: Prikaz opreme za meritve erozije na nivoju pobočja (foto: Nejc Bezak)
Figure 2.7: Equipment for measuring soil erosion at the slope scale (photo: Nejc Bezak)

Za določitev masnih bilanc procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja lahko uporabimo tudi različne geodetske metode, kot je npr. terestrično lasersko skeniranje (TLS) (*ang.* terrestrial laser scanning) (Blasone in sod., 2014) ali aero laserskega skeniranja (ALS) (*ang.* airborne laser scanning) (Carrivick in sod., 2013). Na podlagi periodičnih snemanj in razlik med zaporednimi snemanji v definiranem digitalnem modelu terena (*ang.* digital terrain model) lahko določimo območja, kjer prihaja do izrazitih erozijskih procesov ter dele opazovanega območja, kjer prihaja do odlaganja materiala (Wheaton in sod., 2010).

Pri zgoraj opisanih merilnih tehnikah gre za neposredne meritve. Erozijske procese pa lahko posredno opazujemo tudi s spremljanjem vrednosti rinjenih ter lebdečih plavin v vodotoku. Na ta način lahko določimo zgolj vrednosti, ki se dejansko premestijo do vodotoka, saj se lahko velik del erozijsko sproščenega materiala odloži v porečju. Razmerje med erozijskimi procesi ter premeščanjem rinjenih ter lebdečih plavin lahko opišemo s koeficientom odplavljanja (Lu in sod., 2006). Za meritve rinjenih plavin se lahko uporabijo različne merske metode kot so: lovne košare, akustični merski instrumenti, terestrično lasersko skeniranje, sledila (npr. barvanje ali uporaba magnetov). Verjetno najučinkovitejša metoda pa je izgradnja merske postaje. Na

območju Alp je npr. postaja Rio Cordon ena izmed najstarejših, saj se meritve izvajajo že več kot 20 let (Lenzi in sod., 1999, 2003, 2006; Mao in Lenzi, 2007).

3 METODE DELA

3.1 Opazovani procesi in uporabljane merske metode

V okviru doktorske disertacije smo podrobneje opazovali naslednje procese, ki sestavljajo vodni ter erozijsko-sedimentacijski krog:

- padavine;
- površinski odtok;
- erozijski procesi;
- transport sedimentov.

Za opazovanje teh procesov smo uporabili naslednje merske instrumente:

- meritve padavin s prekucniki ter optičnim disdrometrom;
- meritve gladin vode z uporabo tlačnih sond;
- meritve pretokov z uporabo Dopplerjevega merilca hitrosti ter metode razredčenja;
- meritve erozijskih procesov z uporabo terestričnega laserskega skeniranja (TLS);
- meritve motnosti z uporabo optične metode merjenja (več-parametrna sonda).

Podrobnejši opis procesov in merskih metod je podan v poglavju 2.

3.2 Opis obravnavanih porečij

V nadaljevanju bodo prikazana porečja, ki so bila obravnavana v okviru doktorske disertacije. Najprej bosta opisani dve eksperimentalni porečji, ki sta del porečja Gradaščice in kjer so se izvajale hidrološke meritve, nato pa bodo predstavljena porečja, kjer so se oziroma se še vedno izvajajo meritve v okviru državnega hidrološkega monitoringa, ki ga izvaja ARSO.

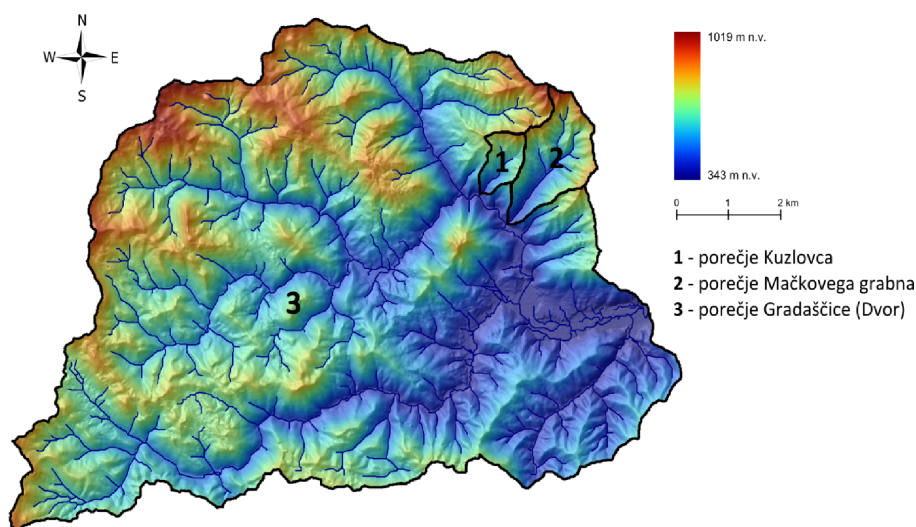
3.2.1 Eksperimentalni porečji Kuzlovec in Mačkov graben

Eksperimentalni porečji Kuzlovec in Mačkov graben sta del porečja Gradaščice. Na teh dveh porečjih ima Katedra za splošno hidrotehniko (KSH, UL FGG) postavljeno sodobno mersko opremo, ki je bila uporabljena tudi za izvajanje meritev v okviru te doktorske disertacije. Nekatere meritve so se izvajale tudi v okviru Evropskega projekta SedAlp (SedAlp, 2015).

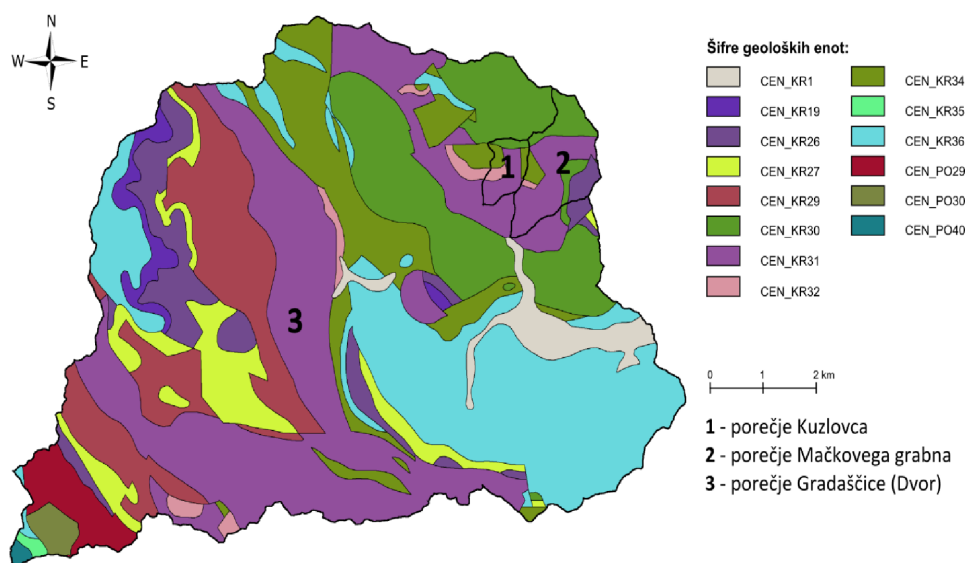
Slika 3.1 prikazuje digitalni model višin (DMV) porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor z vrisanimi vodotoki na tem območju. Na sliki 3.2 je prikazana geološka sestava porečja Gradaščice do postaje Dvor. Za prikaz legende na sliki 3.2 so uporabljene naslednje oznake: CENKR1: Nanosi rek in potokov; CENKR19: Pisan peščenjak, argilit, tufit, apnenec, ponekod z rožencem; CENKR26: Svetlo siv kristalast dolomit; CENKR27: Piroklastiti, apnenec; CENKR29: Dolomit, ploščast apnenec; CENKR30: Neplastovit dolomit; CENKR31: Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; CENKR32: Temno siv apnenec in dolomit - žažarske plasti; CENKR34: Grödenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; CENKR35: Grödenski skladi - zelenkasto siv peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; CENKR36: Glinast skrilavec, alevrolit, peščenjak in konglomerat; CENPO29: Glavni dolomit; CENPO30: Karbonatne in klastične kamenine; boksit; CENPO40: Kremenov peščenjak in glinast skrilavec.

Slika 3.3 prikazuje pedološke kartografske enote (PKE) porečja reke Gradaščice do postaje Dvor, kjer so šifre uporabljene v legendi razložene v preglednici 3.1. Slika 3.4 prikazuje rabo tal istega območja, kjer je za klasifikacijo različnih slojev pokrovnosti uporabljena skupna evropska metodologija CLC (Corine-Land-Cover). V preglednici 3.2 so podani deleži posameznih pokrovnosti tal za porečje Gradaščice do vodomerne postaje Dvor. Opazimo lahko, da je geološka sestava porečja relativno nehomogena (slika 3.2). Nadalje lahko vidimo, da gozd (mešani, iglasti in listnati) pokriva več kot 65 % porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor, ki meri 78,7 km².

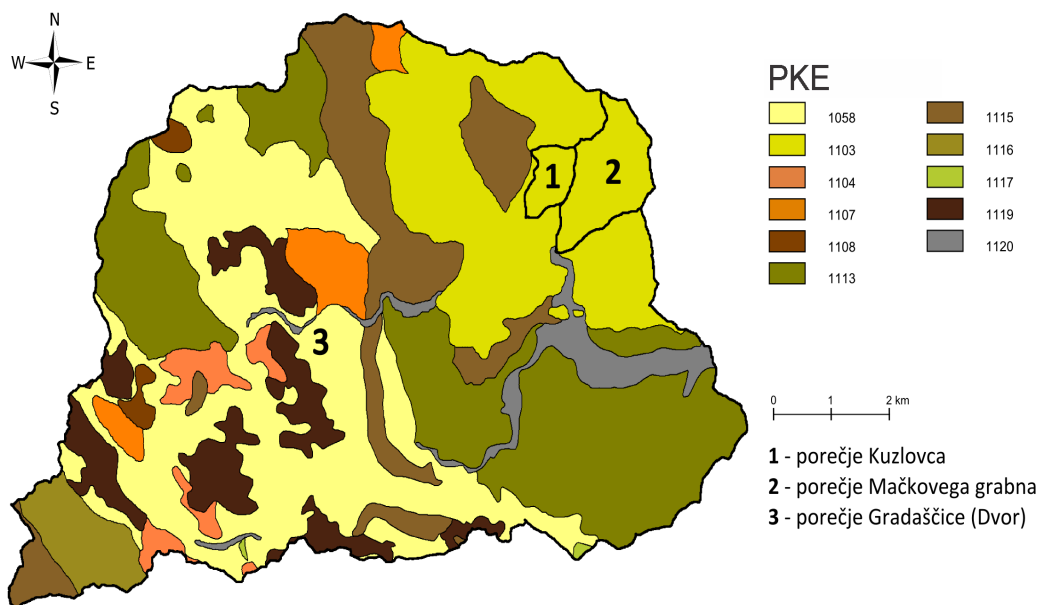
Bezak in sod. (2013b) so prikazali nekatere osnovne značilnosti dveh eksperimentalnih porečij (Kuzlovec in Mačkov graben), ki sta del porečja Gradaščice (več informacij o obeh območjih je v prilogi H).



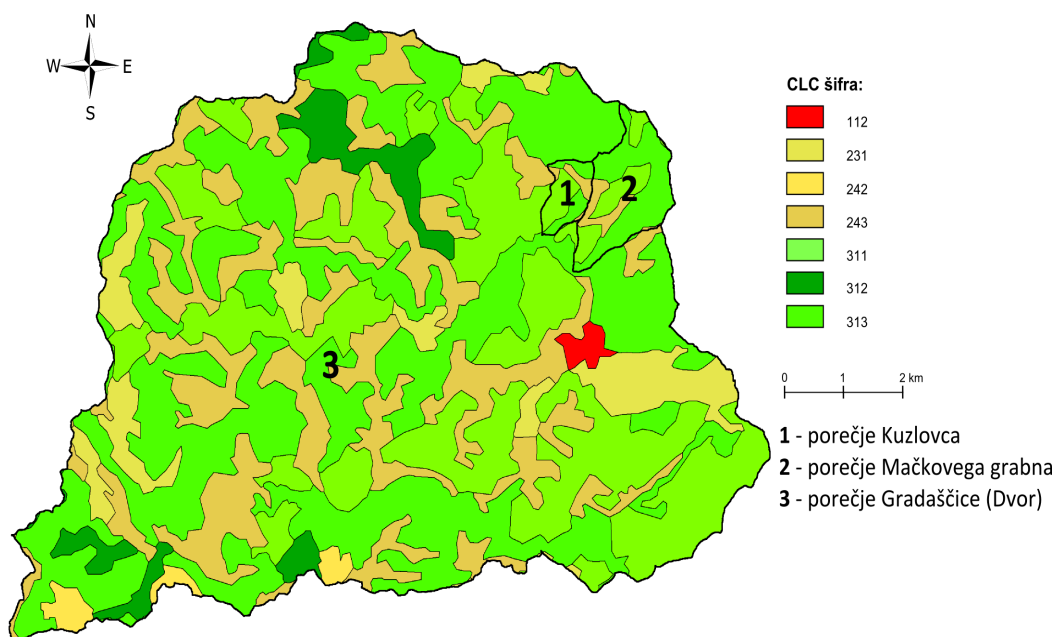
Slika 3.1: Digitalni model višin porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor
Figure 3.1: Digital elevation model of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station



Slika 3.2: Geološka karta porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor
Figure 3.2: Geological map of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station



Slika 3.3: Pedološke kartografske enote (PKE) porečja Gradaščice do vodomerne postaje Dvor
Figure 3.3: Pedological cartographic units (PKE) of the Gradaščica catchment to the Dvor gauging station



Slika 3.4: CLC Corine pokrovnost zemljišč porečja Gradaščice
Figure 3.4: CLC Corine land cover map of the Gradaščica catchment

3.2.2 Porečja, kjer se meritve izvajajo v okviru državnega hidrološkega monitoringa

V okviru doktorske disertacije so bili uporabljeni tudi podatki, ki so bili pridobljeni v okviru državnega hidrološkega monitoringa Republike Slovenije ter Združenih držav Amerike. V Sloveniji je za izvajanje meritev hidroloških spremenljivk zadolžen ARSO (ArhivPV, 2015) v ZDA pa United States Geological Survey (USGS) (USGS, 2015) (podatki so prikazani v prilogi B).

Preglednica 3.1: Opis šifer pedoloških kartografskih enot uporabljenih v legendi slike 3.3
Table 3.1: Description of pedological cartographic unit codes used in the legend of figure 3.3

Šifra	Opis šifre
1058	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 20%
1103	Rendzina, na apnencu in dolomitu, prhninasta 50%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 50%
1104	Rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 70%, rjava, pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 30%
1107	Evtrična rjava tla, na laporju, tipična 80%, evtrična rjava tla, na mehkih karbonatnih kamninah (lapornati apnenci), tipična 20%
1108	Evtrična rjava tla, na vezanih klastičnih pelitskih in psamitskih kamninah, tipična 70%, distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 20%
1113	Distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1115	Distrična rjava tla, na grodenskih peščenjakih, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1116	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 80%, ranker, distričen, erozijski 20%
1117	Distrična rjava tla, na vezanih klastičnih kamninah, tipična 60%, ranker, distričen, regolitični 40%
1119	Rjava pokarbonatna tla, na apnencu in dolomitu, tipična 80%, rendzina, na apnencu in dolomitu, sprsteninasta 20%
1120	Obrečna tla, evtrična, srednje globoka 50%, obrečna tla, evtrična, zmerno oglašena 30%, obrečna tla, evtrična, globoka 20%

Preglednica 3.2: Opis šifer pokrovnosti zemljišč uporabljenih v legendi slike 3.4 in deleži površin posameznih pokrovnosti tal

Table 3.2: Description of CLC Corine land cover codes used in the legend of figure 3.4 and percentages of land-use types

Šifra	Opis CLC šifre	Površina [km ²]	Delež površine [%]
313	Mešani gozd	32,8	41,6
311	Listnati gozd	18,9	24,0
243	Pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije	17,4	22,1
231	Pašniki	5,3	6,7
312	Iglasti gozd	3,3	4,1
242	Kmetijske površine drobnoposestniške strukture	0,8	1,1
112	Nesklepene urbane površine	0,4	0,5

Za izvedbo verjetnostnih analiz z uporabo metode letnih maksimumov (*ang.* annual maximum method; AM) in metode vrednosti nad izbranim pragom (*ang.* peaks-over-threshold; POT) so bili uporabljeni podatki z vodomerne postaje Litija na reki Savi, ki je ena izmed najstarejših postaj s katerimi upravlja ARSO. Več informacij o postaji Litija je podanih v prilogi A ter prilogi C.

Kot osnova za določitev prisotnosti trendov v nekaterih meteoroloških podatkih (npr. povprečne mesečne temperature ali mesečne vsote padavin) so bili uporabljeni tudi podatki z meteoroloških postaj Kredarica, Rateče ter Ljubljana (priloga C).

Poleg podatkov o pretokih ter nekaterih meteoroloških podatkov so bili v disertaciji uporabljeni tudi podatki o koncentracijah suspendiranih snovi (*SSC*), ki so bili prav tako pridobljeni v okviru državnih hidroloških opazovanj. Več informacij o postajah, ki so postavljene na sloven-

skih vodotokih in kjer se že več kot 50 let izvajajo meritve *SSC* vrednosti, je podanih v prilogi G. Postaje, kjer so se meritve *SSC* vrednosti neprekinjeno izvajale daljše časovno obdobje in so bile uporabljene za analize sezonskosti, verjetnostne analize, ugotavljanje prisotnosti trendov in še za nekatere ostale analize (Bezak in sod., 2015c), so opisane v prilogi D. Ulaga (2005, 2006) pa je podala nekatere dodatne informacije o prej omenjenih postajah.

Za izvedbo trivariatnih verjetnostnih analiz z uporabo funkcij kopula, kjer so bili hkrati obravnavani podatki o pretokih ter koncentracijah suspendiranih snovi, so bile uporabljene naslednje postaje:

- Gornja Radgona na reki Muri (Slovenija);
- Trenton na reki Delaware (ZDA);
- Iowa City na reki Iowa (ZDA);
- Newport na reki Juniata (ZDA);
- Point of Rocks na reki Potomac (ZDA);
- Beme na reki Schuylkill (ZDA).

Dodatne informacije o zgoraj omenjenih postajah so na voljo v prilogi B.

V okviru doktorske disertacije smo aplicirali tudi model WATEM/SEDEM za modeliranje erozije tal na naslednjih lokacijah, ki ležijo v Sloveniji:

- Kuzlovec (Kuzlovec);
- Kobarid (Soča);
- Hotešk (Idrijca);
- Veliko Širje (Savinja);
- Šentjakob (Sava).

Natančnejši opis porečij, uporabljenih za modeliranje erozije tal je podan v prilogi F. V prilogi H je več informacij o hudourniškem porečju Kuzlovec, v prilogi G pa so opisana ostala porečja, ki so bila izbrana za modeliranje erozije tal in kjer so se izvajale meritve koncentracij suspendiranih snovi v okviru državnega hidrološkega monitoringa.

3.3 Statistično-matematične metode

V naslednjih poglavjih bodo opisana statistično-matematična orodja oziroma metode, ki so bile uporabljene za analizo podatkov, pridobljenih na eksperimentalnem porečju ter v okviru državnih hidroloških monitoringov (poglavje 3.2). Namen analize podatkov s takšnimi metodami je pridobiti nova znanja in nadgraditi razumevanje o hidroloških procesih, ki jih analiziramo.

3.3.1 Sezonskost ter trendi hidroloških spremenljivk

Za prikaz sezonskih značilnosti analiziranih podatkov je bila uporabljena metoda, ki jo je predlagal Burn (1997) in temelji na prikazu podatkov na krožnici (*ang.* circular statistics). Prikaz enačb za določitev sezonskih karakteristik obravnavanih podatkov je podan v prilogi C. Metodologija za sezonsko analizo podatkov, ki jo je predlagal Burn (1997) je bila uporabljena tudi v raziskavi, ki so jo naredili Bezak in sod. (2015b), kjer so avtorji analizirali značilnosti visokovodnih valov v slovenskih vodotokih.

Za določitev prisotnosti trendov v analiziranih serijah se pogosto uporablja Mann-Kendall test (Kendall, 1975; Douglas in sod., 2000), ki je nekoliko natančneje razložen v prilogi B in prilogi D. Gre za statistični test, s katerim lahko določimo, ali je v analiziranih časovnih serijah prisoten trend (pozitiven ali negativen).

Pogosto pa je pred izvedbo analiz potrebno preveriti, ali je vzorec homogen, kar lahko naredimo npr. z uporabo standardnega normalnega testa homogenosti (*ang.* standard normal homogeneity test) (Sahin in Cigizoglu, 2010). Za določitev potencialnih izločencev (*ang.* outliers) v vzorcu lahko uporabimo test, ki ga je predlagal Grubbs (Grubbs, 1950). Nadalje se lahko za testiranje avtokorelacije (*ang.* autocorrelation) v analiziranem vzorcu uporabi Box-Pierce test (Box in Pierce, 1970). Omenjeni testi in aplikacija na hidroloških podatkih so prikazani v prilogi B in prilogi D.

3.3.2 Metoda letnih maksimumov ter metoda vrednosti nad izbranim pragom

Za izvedbo univariatnih verjetnostnih analiz, kjer analiziramo eno spremenljivko, lahko uporabimo ali metodo letnih maksimumov (AM) (*ang.* annual maximum method) ali metodo vrednosti nad izbranim pragom (POT) (*ang.* peaks-over-threshold method). Natančen opis obeh metod je podan v prilogi A. AM in POT metodi sta bili uporabljeni tudi pri določitvi rezultatov, prikazanih v prilogi B, prilogi C, prilogi D in prilogi E. Pred izvedbo verjetnostnih analiz je potrebno zagotoviti, da je analiziran vzorec homogen, stacionaren ter da v njem ni mogoče zaznati avtokorelacijskih lastnosti, za kar lahko uporabimo teste opisane v poglavju 3.3.1.

Večinoma se za izvedbo verjetnostnih analiz uporabi več različnih porazdelitvenih funkcij, med katerimi se nato izbere tisto, ki se najbolje ujema z analiziranimi podatki. Za izvedbo statističnih testov, s katerimi lahko testiramo ničelno hipotezo, lahko izberemo teste, kot sta Kolmogorov-Smirnov ali Anderson-Darling test (Šraj in sod., 2012). Poleg statističnih testov lahko uporabimo tudi različne kriterije ustreznosti (*ang.* goodness-of-fit criteria) kot so npr. testi RMSE (*ang.* root mean square error), MAE (*ang.* mean absolute error), RMAE (*ang.* relative mean absolute error). Pred dokončno izbiro porazdelitvene funkcije je priporočljivo uporabiti še vsaj en grafični test, s katerim lahko preverimo, ali se izbrana porazdelitev ustrezno ujema s podatki (npr. QQ grafični test). Natančen opis statističnih testov, testov ustreznosti ter grafičnih testov je podan v prilogi A ter v delih Šraj in sod. (2012, 2013).

3.3.3 Funkcije kopula

V zadnjih letih se v hidrološki praksi vse pogosteje uporabljajo tudi funkcije kopula, s katerimi lahko hkrati analiziramo, več v naravi bolj ali manj odvisnih spremenljivk (Salvadori in De Michele, 2004; Grimaldi in Serinaldi, 2006; Genest in Favre, 2007; Salvadori in sod., 2007; Bezak in sod., 2014b; Šraj in sod., 2015). Beseda kopula izhaja iz latinščine, kjer pomeni "povezati". V okoljskih vedah se tako funkcije kopula uporabljajo za povezovanje različnih spremenljivk (procesov) v analizah. Postopek izvedbe multivariatnih verjetnostnih analiz (*ang.* multivariate frequency analysis) z uporabo funkcij kopula lahko opišemo z naslednjimi koraki:

- oblikovanje vzorca (AM metoda ali POT metoda) in izbira spremenljivk (npr. konice pretokov, volumni visokovodnih valov, intenziteta padavin, trajanje padavinskega dogodka), ki jih želimo analizirati;
- izvedba univariatnih verjetnostnih analiz in izbira najustreznejše porazdelitve funkcije za vsako spremenljivko posebej (t.i. določitev robnih porazdelitvenih funkcij (*ang.* marginal distributions));
- ocena odvisnosti med izbranimi spremenljivkami, na podlagi katere izberemo kopule, ki jih lahko apliciramo na izbrane podatke;

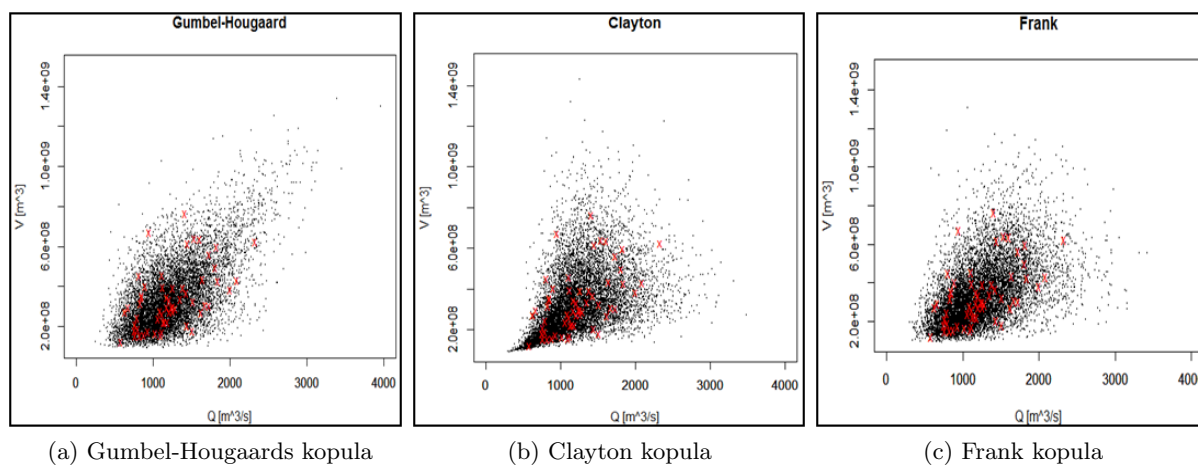
- ocena parametrov izbranih funkcij kopula ter izbira najustreznejše kopule;
- določitev povezave med multivariatnimi povratnimi dobami in ocenjenimi vrednostmi spremenljivk.

Opazimo lahko, da je izvedba univariatnih verjetnostnih analiz (poglavje 3.3.2) eden izmed korakov oziroma prvi korak pri izvedbi multivariatnih verjetnostnih analiz s funkcijami kopula. Podobno kot pri običajnih porazdelitvenih funkcijah lahko tudi pri multivariatnih analizah uporabimo različne kopule, ki pripadajo različnim družinam kopul. Ustrezen nabor kopul določimo na podlagi ocene odvisnosti med spremenljivkami (več informacij je v prilogi B in prilogi E). V prilogi E so podane nekatere simetrične funkcije kopula (*ang.* symmetric copula), ki se pogosto uporabljajo za bivariate analize hidroloških podatkov, v prilogi B pa so opisane nekatere trivariate simetrične ter asimetrične kopule (*ang.* asymmetric copula) iz Arhimedove družine kopul. Za oceno parametrov kopul lahko uporabimo eno izmed naslednjih metod:

- metoda momentov (*ang.* method of moments);
- metodo največjega verjetja (*ang.* maximum likelihood method);
- metodo največjega pseudo-verjetja (*ang.* maximum pseudo-likelihood method).

Razširjen opis prednosti in slabosti posameznih metod so podali Joe (1997); Nelsen (2006); Salvadori in sod. (2007), uporaba metode momentov in metode največjega pseudo-verjetja pa je prikazana v prilogi B in prilogi E.

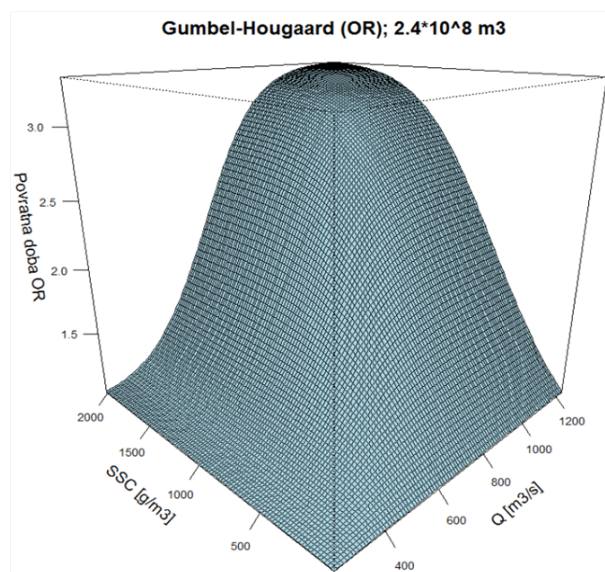
Genest in sod. (2009) so naredili pregled in primerjavo nekaterih statističnih testov, ki jih lahko uporabimo pri multivariatnih analizah. Statistični testi, ki so bili uporabljeni v okviru doktorske disertacije, pa so prikazani v prilogi B in prilogi E. Poleg tega priloga B in priloga E prikazujeta tudi nekaj grafičnih testov, s katerimi lahko potrdimo ali zavrnemo rezultate statističnih testov (Genest in Favre, 2007). Slika 3.5 prikazuje primer grafičnega testa za preverjanje ustreznosti različnih funkcij kopula, ki imajo različne značilnosti. Rdeče točke prikazujejo dejanske izmerjene podatke, medtem ko črne točke prikazujejo generirane vrednosti z uporabo definirane kopula modela.



Slika 3.5: Prikaz grafičnih testov za preverjanje ustreznosti določenih kopul
Figure 3.5: Example of graphical goodness-of-fit test for different copula functions

Nadalje so Salvadori in sod. (2007), Vandenberghe in sod. (2011) ter Graler in sod. (2013) naredili pregled različnih teoretičnih definicij povratnih dob, ki so povezane z multivariatnimi analizami.

Šraj in sod. (2013) so naredili primerjavo med rezultati bivariatnih ter običajnih univariatnih verjetnostnih analiz za primer vodomerne postaje v Slovenije. V prilogi B in prilogi E je podanih več informacij o primarnih in sekundarnih povratnih dobah, ki so bile uporabljene v okviru analiz izvedenih v sklopu doktorske disertacije. Slika 3.6 prikazuje povezavo med tremi izbranimi spremenljivkami (konice pretokov, volumni visokovodnih valov in koncentracijami suspendiranih snovi) in povratno dobo OR, ki je prikazana v Salvadori in sod. (2007), z uporabo Gumbel-Hougaard kopule. Povratna doba OR (*slo.* ALI) označuje primer, ko se zgodi vsaj ena izmed obravnavanih spremenljivk, pogosto pa se srečamo tudi s povratno dobo AND (*slo.* IN), ki označuje primer, ko se hkrati zgodijo vse obravnavane spremenljivke ((Salvadori in sod., 2007)).



Slika 3.6: Določitev povratne dobe OR za primer hkratne analize treh spremenljivk z uporabo Gumbel-Hougaard kopule (SSC =koncentracije suspendiranih snovi; Q =konice pretokov)

Figure 3.6: Determination of the OR return period for the trivariate case using the Gumbel-Hougaard copula (SSC =suspended sediment concentration; Q =peak discharge)

3.4 Modeliranje erozije tal

Za modeliranje erozije tal lahko uporabimo procesno utemeljene modele kot so npr. WEPP, LISEM in PESERA (Petkovšek, 2000), empirične oziroma pol-empirične modele, kot je USLE (Petkovšek, 2002), ali pa konceptualne modele. Petkovšek (2000, 2002) je podal več informacij o nekaterih procesno utemeljenih modelih (npr. WEPP, LISEM, TOPOG), natančnejši opis modela PESERA pa je dostopen na spletni strani http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/pesera/pesera_data.html. V okviru doktorske disertacije smo za modeliranje erozije tal uporabili model WATEM/SEDEM, ki omogoča prostorsko porazdeljeno modeliranje in bo podrobneje opisan v poglavju 3.4.2. Ena izmed prednosti modela WATEM/SEDEM je to, da je model prosto dostopen (<http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/erosion/watemedem2006/index.htm>).

3.4.1 V Sloveniji pogosto uporabljene metode za modeliranje erozije tal

V Sloveniji se je za vrednotenje erozije tal pogosto uporabljala enačba, ki je bila razvita za območje Sredozemlja in jo je definiral Gavrilovič (1970):

$$W = 3,14 * H_Y * K_T * K_Z^{1,5} * F_W \quad (1)$$

kjer je F_W površina porečja [km^2], H_Y so srednje letne padavine [mm], K_T je temperaturni koeficient območja, K_Z pa erozijski koeficient območja (Petkovšek, 2002). Enačba 1 omogoča izračun srednjega letnega sproščanja zemljin W [m^3/leto] (Petkovšek, 2002). V svetovnem merilu pa se veliko pogosteje uporablja empirična enačba USLE oziroma njene posodobitve kot sta RUSLE ali MUSLE. Enačba RUSLE ima naslednjo obliko (Renard in sod., 1997):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (2)$$

kjer je R parameter erozivnosti padavin (Petan, 2010), K parameter erodibilnosti zemljine, L dejavnik dolžine pobočja, S dejavnik naklona pobočja, C parameter pokrovnosti tal in P parameter kmetijskih zaščitnih ukrepov (Petkovšek, 2002). Z uporabo enačbe 2 lahko določimo povprečno letno izgubo tal na enoto površine [$\text{kg}/\text{ha} * \text{leto}$]. Panagos in sod. (2014) so naredili primerjavo med rezultati PESERA modela in podatkovno bazo EIONET-SOIL, kjer so zbrani rezultati vrednotenja erozije tal z uporabo USLE in RUSLE metodologije. Primerjava je bila izvedena za 8 držav, ki so članice Evropske skupnosti. Podobna primerjava med različnimi modeli (WATEM/SEDEM, RUSLE, PESERA) je bila izvedena tudi za 61 porečij v Španiji (de Vente in sod., 2008).

3.4.2 Model WATEM/SEDEM

Za modeliranje erozije tal se lahko uporabi tudi model WATEM/SEDEM (Alatorre in sod., 2010; de Vente in sod., 2008; Shi in sod., 2012; Van Rompaey in sod., 2002), ki končne rezultate povprečne letne izgube tal izračuna na podlagi naslednjih korakov:

- Določitev povprečne letne izgube tal A [$\text{kg} * \text{m}^{-2} * \text{leto}^{-1}$] z uporabo metode RUSLE (Renard in sod., 1997);
- Izračun letne transportne sposobnosti T_C [$\text{kg} * \text{m}^{-2} * \text{leto}^{-1}$] za vsako računsko celico;
- Za vsako računsko celico program določi lokalne vrednosti erozije ter količino sedimentov, ki v celico pridejo iz gorvodnih delov porečja z uporabo algoritma večsmernega toka (*ang.* multiple flow algorithm) (Verstraeten in Prosser, 2008). V primeru, da je transportna sposobnost celice večja, kot dotok sedimentov, se ves material premesti dolvodno, v nasprotnem primeru v računski celici pride do odlaganja materiala.

Osnovna različica modela WATEM/SEDEM za izračun uporablja računske celice v velikosti $20 * 20$ m. Za izračun končnih rezultatov pa je potrebno modelu podati naslednje vhodne podatke v obliki rastrskih slojev:

- digitalni model višin (DMV);
- parcelno karto (*ang.* parcel map), kjer so posebej označene ceste, reke, kmetijska zemljišča, gozdovi ter travniki;
- karto erozivnosti padavin R ;
- karto erodibilnosti zemljine K ;
- karto pokrovnosti tal C ;

Priporočljivo je, da vse vhodne podatke podamo kot rastrske sloje, kljub temu pa je nekaterim spremenljivkam možno pripisati konstantno vrednost za celotno obravnavano območje (npr. faktor erozivnosti padavin R ali faktor erodibilnosti zemljin K). Več informacij o modelu WATEM/SEDEM je podanih v prilogi F.

Za umerjanje modela WATEM/SEDEM je bil uporabljen prosto dostopni program za ocenjevanje parametrov PEST (<http://www.pesthomepage.org/>), ki omogoča avtomatično umerjanje različnih programov. Za aplikacijo PEST orodij morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji:

- parametri modela in modelni izračuni morajo biti zapisani v ASCII datoteki;
- program, pri katerem želimo oceniti parametre, lahko modelne izračune do konca izvede brez posredovanja uporabnika.

V primeru modela WATEM/SEDEM smo morali uporabiti še program AutoIt (<https://www.autoitscript.com/site/autoit/>) s katerim smo zagotovili, da je model končne izračune določil brez pomoči uporabnika. Več informacij o postopku je v prilogi F. PEST je bil že uspešno uporabljen za kalibracijo različnih hidroloških programov, kot sta HSPF (Doherty in Johnston, 2003) in HBV (Kotar, 2013). PEST je vključen tudi v program Groundwater Vistas (<https://www.rockware.com/product/overview.php?id=147>), ki združuje MODFLOW module in PEST. Več informacij o avtomatičnem umerjanju modela WATEM/SEDEM s programom PEST je podanih v prilogi F.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

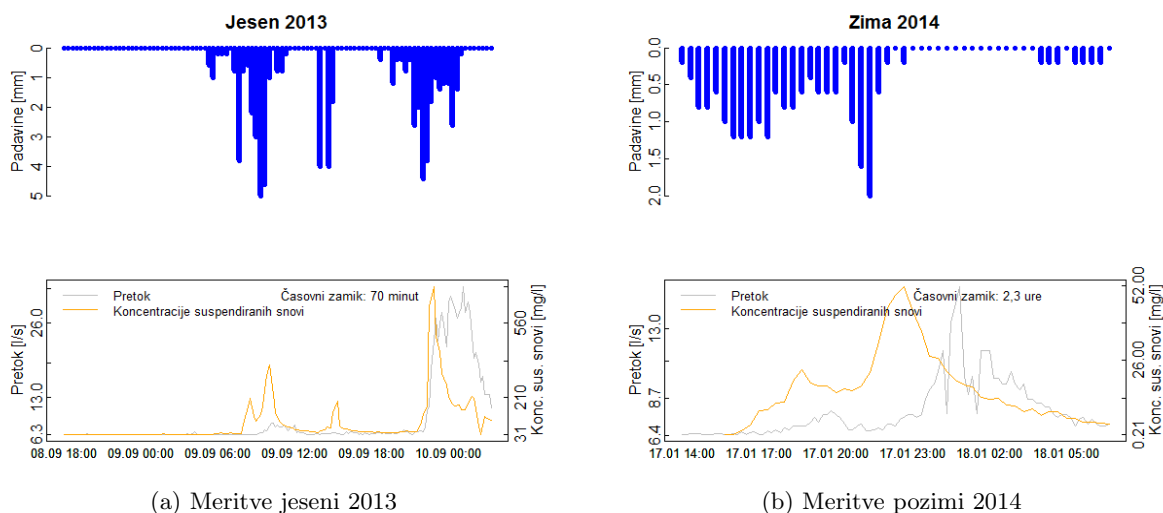
Prikaz rezultatov in njihova primerjava z ugotovitvami drugih raziskovalcev je narejena v naslednjih štirih podpoglavjih. Prvi del prikazuje rezultate meritev izvedenih na eksperimentalnem porečju Gradaščice (poglavje 4.1), sledi analiza povezanosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi, kjer je poudarek na porečjih, kjer so se meritve izvajale v okviru državnega hidrološkega monitoringa (poglavje 4.2), nato so prikazani rezultati modeliranja erozije tal z uporabo modela WATEM/SEDEM (poglavje 4.3) in na koncu so prikazani še primeri aplikacij funkcij kopula na različnih hidroloških podatkih (poglavje 4.4).

4.1 Rezultati meritev na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice

V tem poglavju so prikazane meritve, ki so bile izvedene na eksperimentalnih porečjih Kuzlovec ter Mačkov graben, ki sta del porečja reke Gradaščice. Vsa tri območja so opisana v poglavju 3.2.1.

4.1.1 Rezultati meritev padavin, pretokov in fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi

V prilogi H in poglavju 2.2 je prikazana merska oprema uporabljena na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice. Slike 4.1, 4.2, 4.3 prikazujejo meritve padavin (uporabljeni prekucniki), pretokov (določeni na podlagi meritev s tlačno sondo in uporabo pretočne krivulje) ter meritev koncentracij suspendiranih snovi (multiparameterska sonda). Meritve padavin se izvajajo tudi z optičnim disdrometrom, kjer so podatki v realnem času dostopni na spletu: <http://ksh.fgg.uni-lj.si/avp/DisCrniVrh/>. V prilogi H je opisan postopek določitve zveze med motnostjo [NTU] in koncentracijo suspendiranih snovi [mg/l] ter postopek definiranja pretočne krivulje.

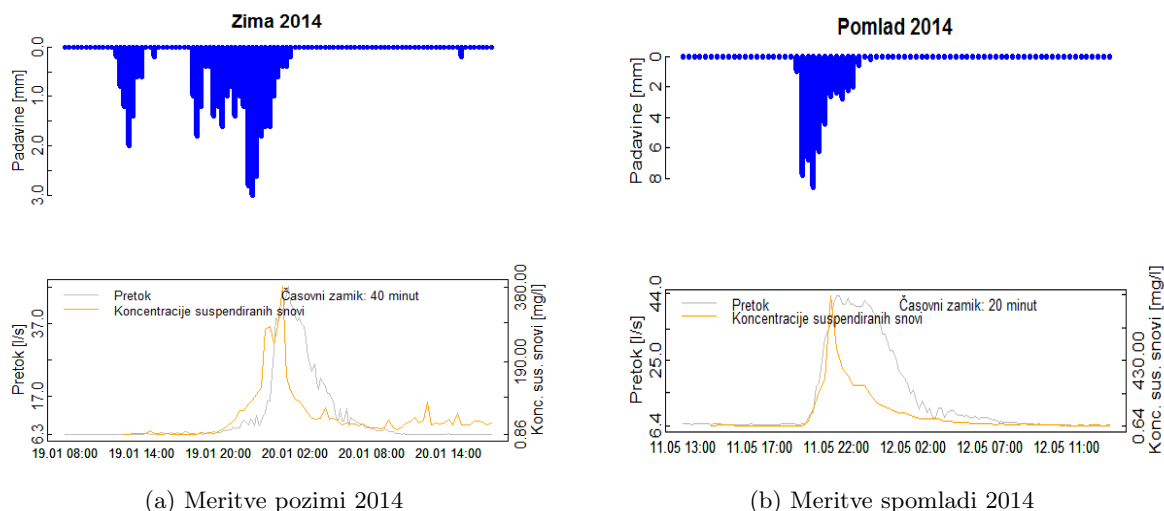


Slika 4.1: Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec I

Figure 4.1: Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment I

V obdobju med poletjem 2013 in poletjem 2014 so se meritve motnosti izvajale na hudourniškem območju Kuzlovca (poglavje 3.2.1). V tem obdobju je bilo z multiparametersko sondo (MS5 Hydrolab, OTT) izmerjenih več kot 10 nadpovprečnih dogodkov (slike 4.1, 4.2, 4.3). V večini primerov je do nastopa konice koncentracije suspendiranih snovi prišlo pred nastopom konice

pretoka, kjer je časovni zamik znašal med 20 minutami in 4 urami. Takšno odvisnost med tema dvema spremenljivkama lahko imenujemo tudi pozitivna histereza, ki je značilna predvsem za manjša porečja, kjer se potencialni viri sedimentov nahajajo v bližini struge oziroma v strugi sami (Bača, 2008; Soler in sod., 2008). Negativna histereza oziroma pojav, ko konica pretoka nastopi pred konico koncentracij suspendiranih snovi, pa je večinoma značilna za porečja, kjer so glavni viri sedimentov precej oddaljeni od rečne struge (Bača, 2008). Na slikah 4.1, 4.2, 4.3 so prikazani nekateri dogodki, ki so bili izmerjeni v vseh štirih letnih časih (pomlad, poletje, jesen, zima).



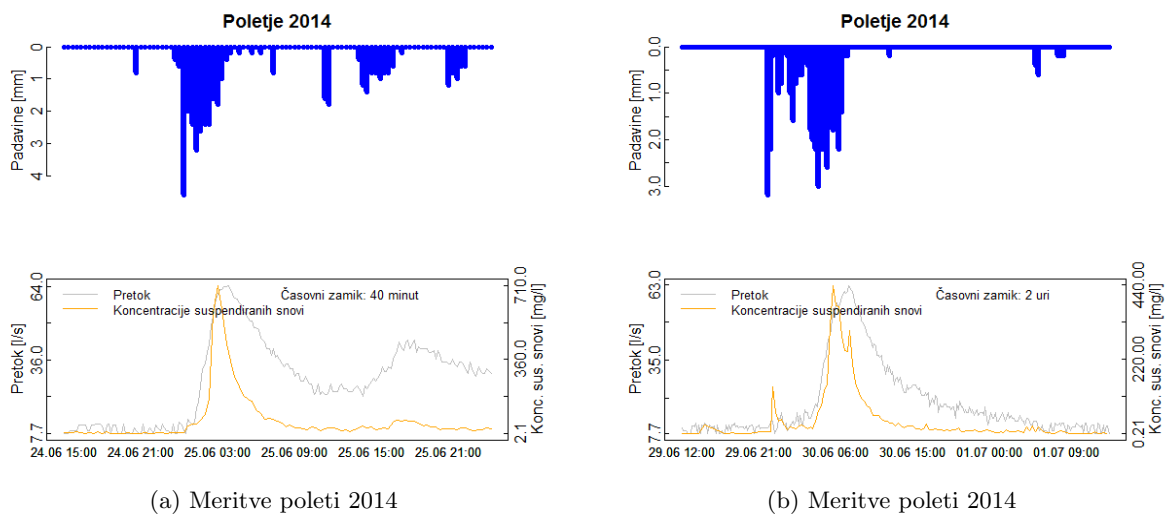
Slika 4.2: Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec II

Figure 4.2: Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment II

Dodatne informacije o medsebojni povezanosti pretokov, padavin in koncentracij suspendiranih snovi so podane v poglavju 4.4.3 ter v prilogi I.

Na podlagi meritev koncentracij suspendiranih snovi, pretokov in padavin in z uporabo metodologije, prikazane v poglavju 4.4.3 ter v prilogi I, smo ocenili, da se je skozi prečni profil postaje Kuzlovec, ki se nahaja na iztoku iz porečja (poglavje 3.2.1), v obdobju med junijem 2013 in junijem 2014 premestilo približno 5 t suspendiranega materiala. Ob tem je potrebno dodati, da je bilo obravnavano obdobje z vidika intenzivnosti procesov precej neaktivno, saj sta se kasneje v drugi polovici leta 2014 zgodila dva izrazito nadpovprečna dogodka, ki bosta prikazana v poglavju 4.1.2. Iz rezultatov, prikazanih v prilogi I, je razvidno, da smo najvišje koncentracije suspendiranih snovi zabeležili oziroma ocenili pozimi in jeseni v obdobju, ko so se izvajale meritve motnosti na Kuzlovcu (preglednica 2 v prilogi I).

Od jeseni leta 2014 se meritve motnosti izvajajo na lokaciji vodomerne postaje Dvor, kjer ARSO izvaja meritve pretokov v okviru državnega hidrološkega monitoringa (poglavje 3.2). Slike 4.4, 4.5, 4.6 prikazujejo meritve koncentracij suspendiranih snovi na vodomerni postaji Dvor. Tudi pri meritvah koncentracij suspendiranih snovi na vodomerni postaji Dvor smo opazili, da do nastopa konice koncentracij suspendiranih snovi pride pred nastopom konice pretoka. Časovni zamiki so znašali 2 uri za dogodek na sliki 4.4, 1,5 ure za obe konici na sliki 4.5a, 5 ur za dogodek na sliki 4.6a ter 2 uri za konici na sliki 4.6b. Medtem, ko je pri dogodku na sliki 4.5b konica pretoka nastopila 1 uro pred konico koncentracij suspendiranih snovi.

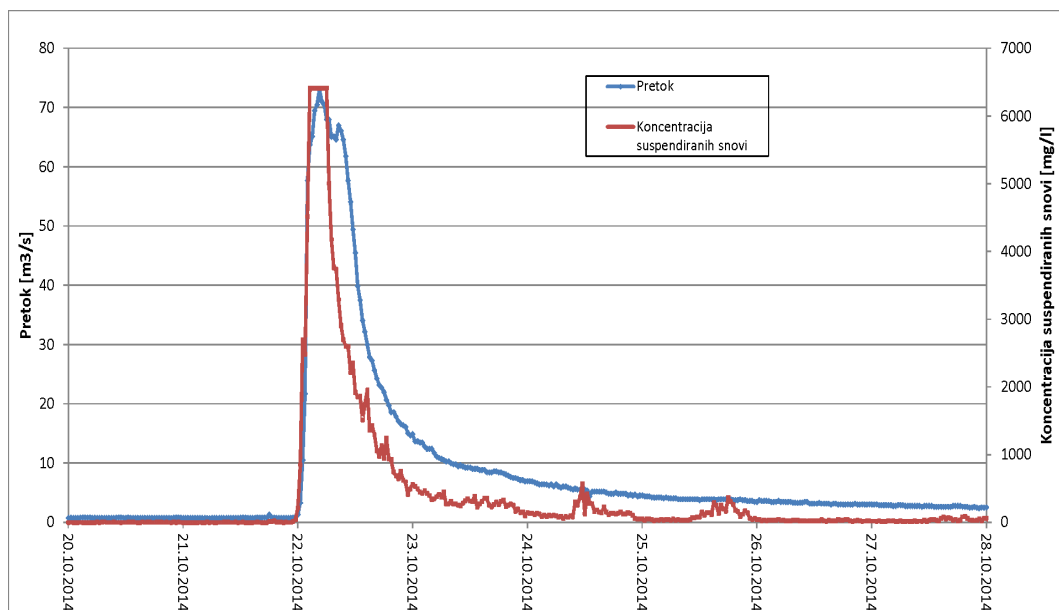


(a) Meritve poleti 2014

(b) Meritve poleti 2014

Slika 4.3: Prikaz meritev pretokov [m^3/s], koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] ter padavin [mm] na eksperimentalnem porečju Kuzlovec III

Figure 4.3: Discharge [m^3/s], suspended sediment [mg/l] and precipitation [mm] measurements at the Kuzlovec catchment III

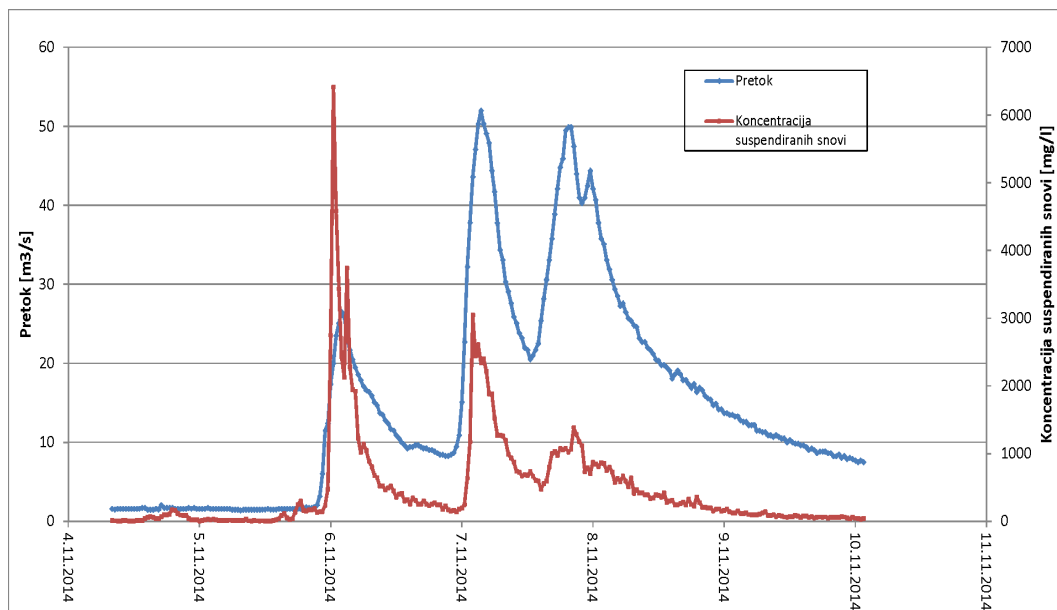


Slika 4.4: Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor I (porečje Gradašnice)

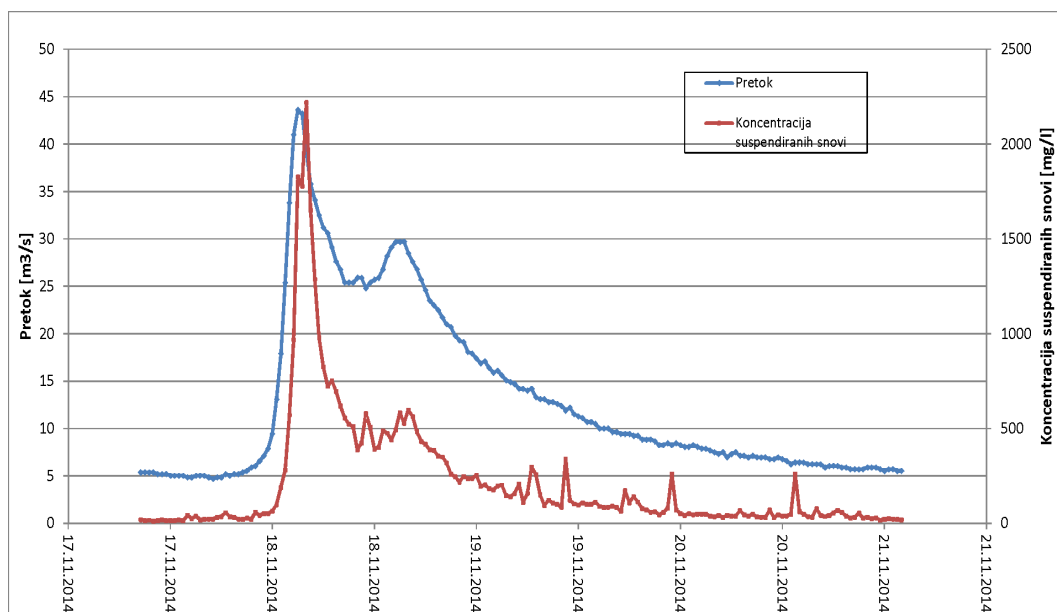
Figure 4.4: Discharge [m^3/s] and suspended sediment measurements [mg/l] at the Dvor gauging station I (Gradašica catchment)

Dogodek na sliki 4.4, ki se je zgodil oktobra 2014, je imel ocenjeno povratno dobo pretokov med 30 in 50 let (PovratneDP, 2013), kar pomeni, da je šlo za relativno ekstremen dogodek. V obdobju trajanja dogodka se je skozi prečni profil vodomerne postaje Dvor premestilo približno 12.000 t suspendiranega materiala. Poleg tega lahko iz slike 4.4 opazimo, da so maksimalne izmerjene vrednosti motnosti presegale merilno območje multiparametrskе sonde, ki znaša od 0 do 3.000 NTU (6390 mg/l).

Na sliki 4.5a je lepo viden tudi proces črpanja sedimentov (*ang.* sediment depletion), ki je eden



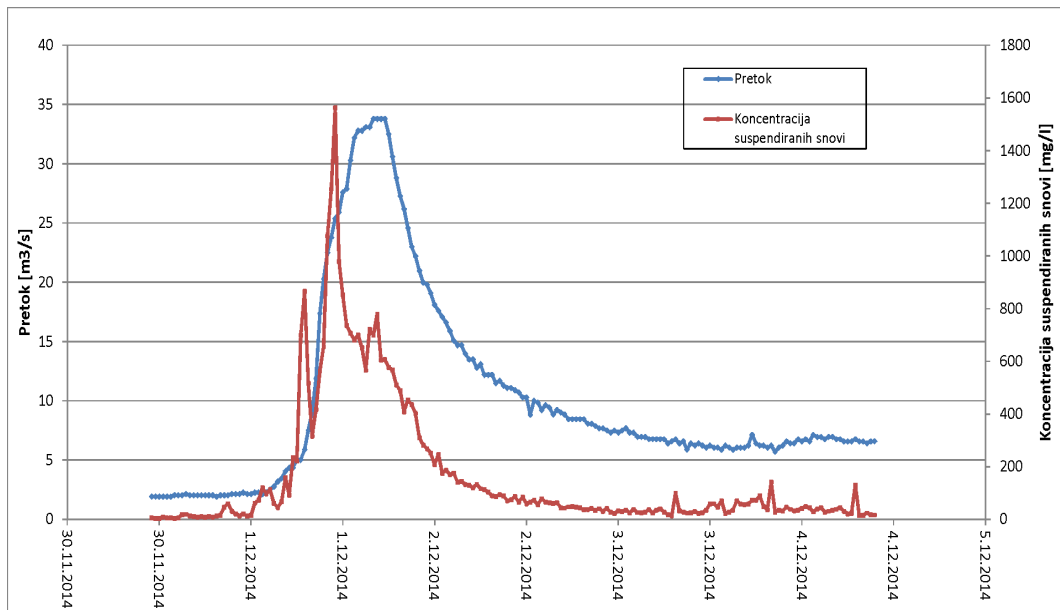
(a) Meritve jeseni 2014



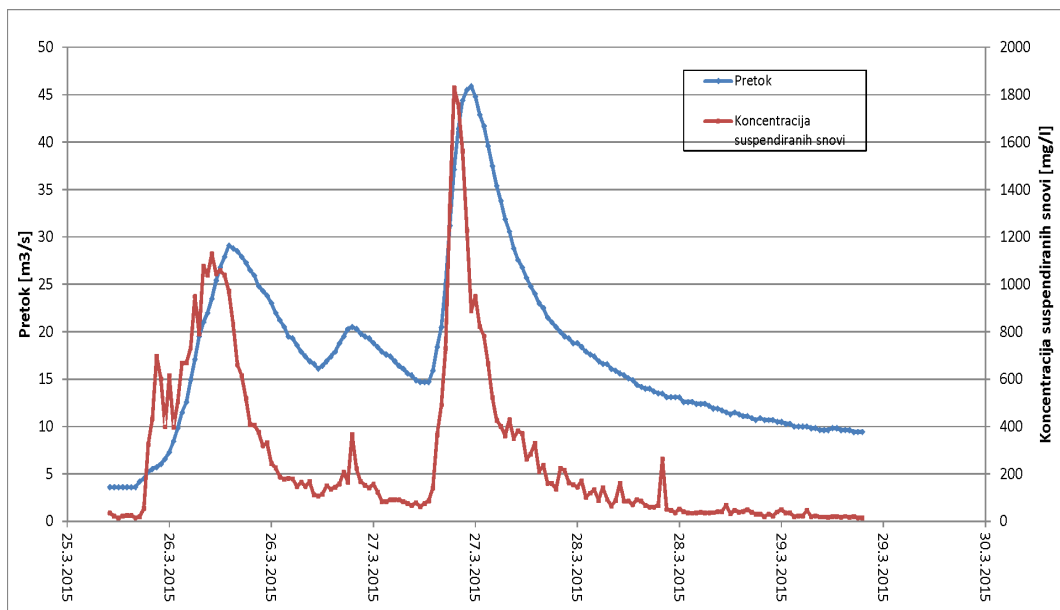
(b) Meritve jeseni 2014

Slika 4.5: Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor II (porečje Gradaščice)Figure 4.5: Discharge [m^3/s] and suspended sediment [mg/l] measurements at the Dvor gauging station II (Gradaščica catchment)

izmed najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na dinamiko procesov, povezanih s premeščanjem sedimentov, in posledično tudi na pozitivne oziroma negativne histereze, ki jih lahko opazimo v povezavi med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi (Bača, 2008; De Sutter in sod., 2001). Gre za proces, ko je pri zaporednih dogodkih, količina premeščenih sedimentov pri vsakem dogodku manjša, saj je vsakič na razpolago manj potencialnih virov sedimentov. Na tem mestu je potrebno omeniti še fenomen prvega vala odplavljanja sedimentov (*ang.* first flush), kjer gre za proces, ko lahko po daljšem obdobju, v katerem ni bilo izrazitega padavinskega dogodka, pričakujemo intenzivnejše procese transporta sedimentov (tudi ostalih snovi, ki jih lahko premešča voda), kot v primeru več zaporednih dogodkov (Bača, 2008; Eder in sod., 2014).



(a) Meritve pozimi 2014



(b) Meritve spomladi 2015

Slika 4.6: Prikaz meritev pretokov [m^3/s] in koncentracij suspendiranih snovi [mg/l] na vodomerni postaji Dvor III (porečje Gradaščice)

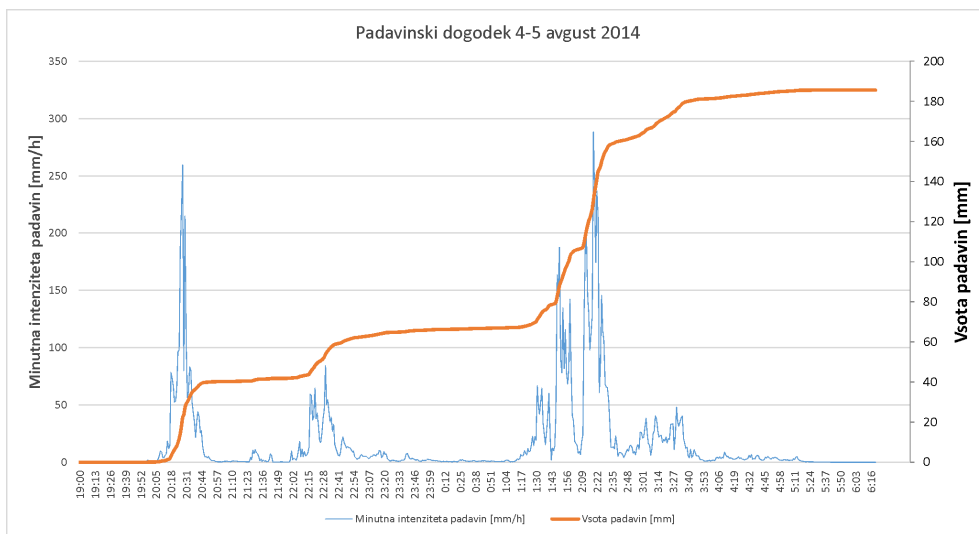
Figure 4.6: Discharge [m^3/s] and suspended sediment [mg/l] measurements at the Dvor gauging station III (Gradaščica catchment)

4.1.2 Rezultati meritev erozijskih procesov

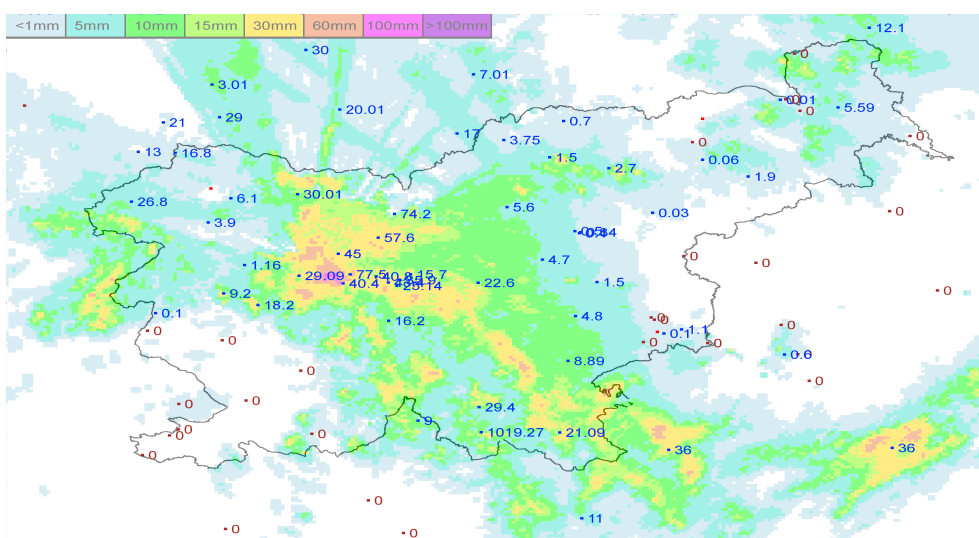
Na eksperimentalnem porečju Kuzlovca so se izvajale tudi posredne meritve erozijskih procesov z uporabo terestričnega laserskega skeniranja (TLS), na podlagi katerega je bil določen digitalni model reliefa (DMR). Grigillo in sod. (2014, 2015) so podali več informacij o postopku določitve DMR-ja na podlagi TLS za območje Kuzlovca, kjer je zaradi specifičnosti hudourniških območij potrebno uporabiti posebne algoritme za odstranitev dreves.

Prvo skeniranje je bilo izvedeno aprila 2013, drugo avgusta 2014 po ekstremnem padavinskem

dogodku, ki se je zgodil v noči s 4. na 5. avgusta 2014, ko je v približno 9 urah padlo med 110 in 140 mm padavin (količina padavin izmerjena s prekucniki), kar pomeni, da je bila povratna doba tega padavinskega dogodka večja kot 100 let (Bezak in sod., 2015a). Zaradi te ujme je bilo poškodovanih približno 50 km cest, celotna škoda pa je bila ocenjena na približno 0,5 milijona EUR (Bezak in sod., 2015a). Sliki 4.7 in 4.8 prikazujeta meritve padavin izvedenih z disdrometrom postavljenim na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (poglavje 2.2.1) in meteorološkim radarjem s katerim upravlja ARSO (Petan, 2014). Zaradi ekstremnih meteoroloških in hidroloških razmer se je sprožilo približno 50 plitvih plazov, zaradi velikih količin plavja (večinoma posledica žledu, ki se je zgodil februarja 2014) je bilo poškodovanih tudi nekaj mostov (Bezak in sod., 2015a). Sliki 4.9 prikazujeta razmere v porečju Gradašnice po ekstremnem dogodku, ki se je zgodil avgusta 2014.



Slika 4.7: Meritve intenzitete padavin in vsote padavin [mm/h in mm] z disdrometrom
Figure 4.7: Measurement of rainfall intensity and accumulated rainfall with disdrometer [mm/h in mm]



Slika 4.8: Meritve padavin [mm] z uporabo meteorološkega radarja (4-5 avgust 2014)
Figure 4.8: Rainfall radar measurements [mm] (4-5 August 2014)

Na podlagi terenskih ogledov smo ugotovili, da je bila tudi dinamika erozijskih procesov sproščanja, premeščanja in odlaganja zelo velika, kar je razvidno iz slike 4.10, ki prikazuje razmere v

hudourniku Kuzlovec pred (leto 2012) in po (leto 2014) prej omenjenem ekstremnem dogodku.



(a) Med dogodkom se je sprožilo več kot 50 plitvih plazov



(b) Zaradi velike količine plavja je bila poškodovana cestna infrastruktura

Slika 4.9: Posledice ekstremnih meteoroloških razmer v noči s 4. na 5. avgust 2014 (foto: Matej Sečnik)

Figure 4.9: Consequences of the extreme meteorological conditions on the night from 4th to 5th of August 2014 (photo: Matej Sečnik)



(a) Situacija v Kuzlovcu leta 2012

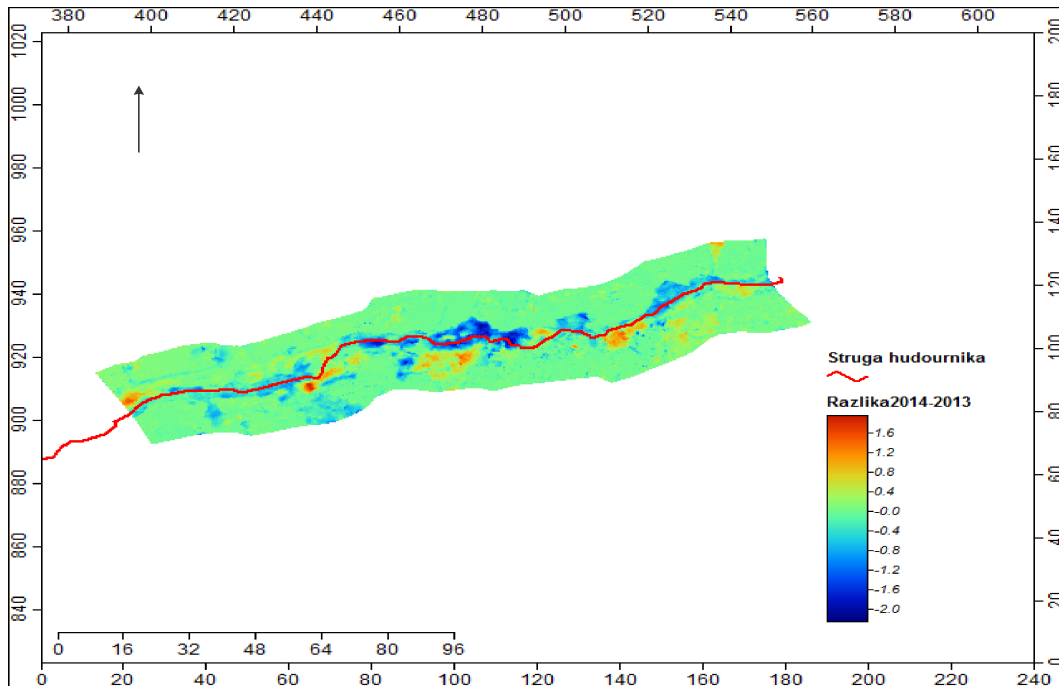


(b) Situacija v Kuzlovcu leta 2014

Slika 4.10: Prikaz razmer na območju Kuzlovca pred in po ekstremnem padavinskem dogodku (foto: Mojca Kogoj)

Figure 4.10: Situation in the Kuzlovec torrent before and after the extreme rainfall event (photo: Mojca Kogoj)

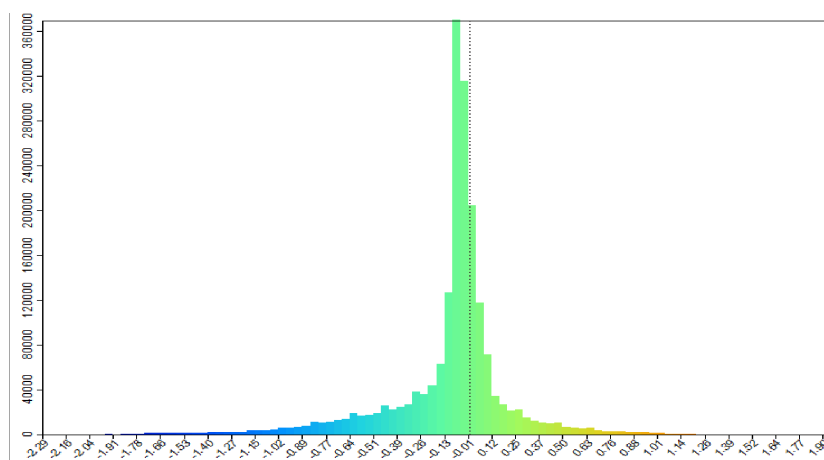
Slika 4.11 prikazuje razliko med dvema digitalnima modeloma reliefa z velikostjo celic 5 cm (*ang.* DEM of difference), ki sta bila določena na podlagi TLS snemanj aprila 2013 in avgusta 2014. Prikazano je manjše območje v velikosti približno 25*160 metrov. Povprečna razlika med DMR-jem iz leta 2014 in 2013, ki je bila določena na podlagi približno $1,93 \cdot 10^6$ celic, je znašala 0,104 metra, kar pomeni, da se je z opazovanega območja premestilo več kot 400 m³ materiala. Na podlagi ocenjenih vrednosti transporta suspendiranih snovi, prikazanih v poglavju 4.1.1, lahko sklepamo, da je zaradi ekstremnega padavinskega dogodka (slike 4.7, 4.8, 4.9), med katerim se meritve koncentracij suspendiranih snovi niso izvajale, prišlo do izrazitih erozijskih procesov, ki so razvidni iz slike 4.11. Količina sproščenega drobno in bolj grobozrnatega materiala je bila nekaj velikostnih razredov nad običajnimi količinami, ki smo jih izmerili z uporabo multipara-



Slika 4.11: Prikaz višinskih razlik [m] med digitalnim modelom reliefa posnetim aprila 2013 in avgusta 2014

Figure 4.11: Difference [m] between digital terrain model from April 2013 and August 2014

meterske sonde (poglavje 4.1.1). Z uporabo metodologije prikazane v prilogi I smo ocenili, da se je v obdobju od junija 2013 do maja 2014 skozi prečni profil postaje Kuzlovec premestilo približno 5 t suspendiranega materiala. Ti rezultati kažejo, da je za procese fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi in tudi za premeščanje grobozrnatega erozijskega drobirja značilna velika časovna spremenljivost. To pomeni, da se večinoma velik del materiala premesti ob nekaj ekstremnih dogodkih, ki se lahko zgodijo na vsakih nekaj let (Lenzi in Marchi, 2000). Nadalje so nekateri avtorji ugotovili, da imajo lahko tudi dogodki, za katere so značilne relativno povprečne magnitude, pomemben vpliv na količine fluvialno premeščenih suspendiranih snovi (Tena in sod., 2011).



Slika 4.12: Histogram števila celic glede na erozijo (negativne vrednosti) ali odlaganje sedimentov (pozitivne vrednosti)

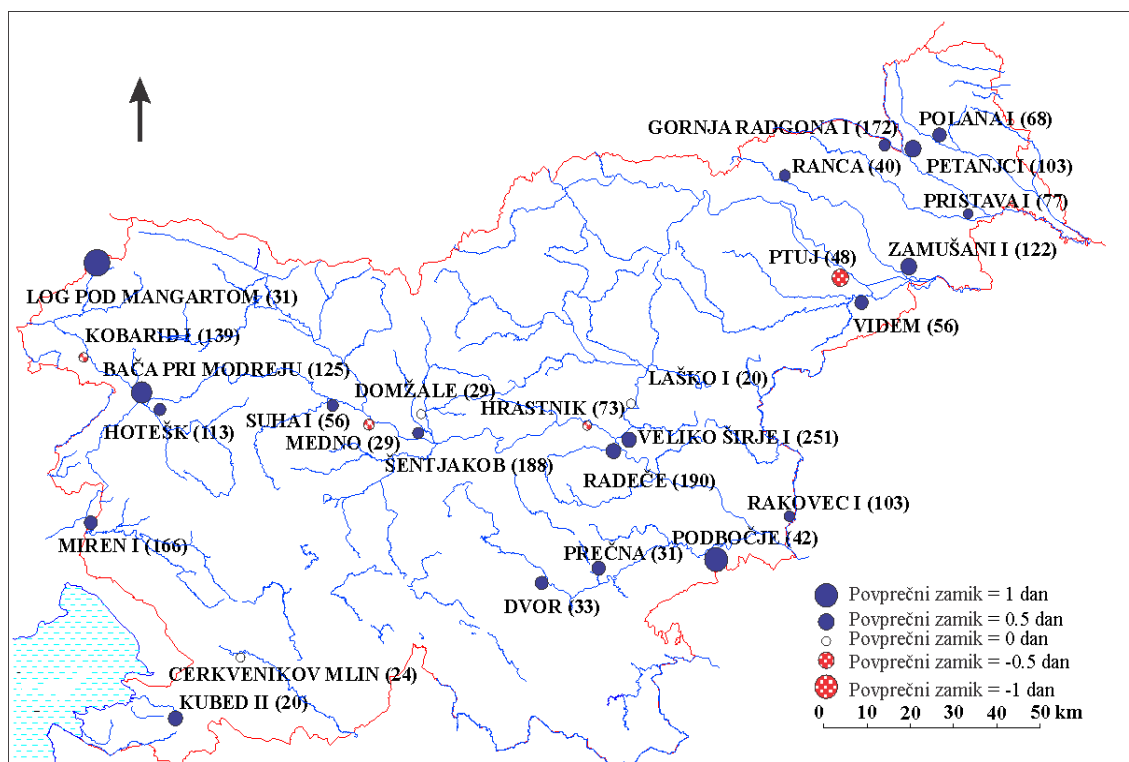
Figure 4.12: Histogram showing number of cells (y-axis) with positive or negative DoD values (x-axis)

Slika 4.12 prikazuje razmerje med številom celic in razlikami med rezultati TLS snemanj iz leta 2013 in leta 2014. Negativne vrednosti označujejo erozijo, pozitivne pa odlaganje sedimentov. Opazimo lahko, da je za večje število celic značilna negativna vrednost razlik med DMR iz leta 2014 ter 2013 (slika 4.12).

4.2 Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi

4.2.1 Povezava med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih

Poleg terenskih meritev, ki so potekale na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice (poglavje 4.1), smo analizirali tudi podatke o koncentracijah suspendiranih snovi, ki jih je v več kot 50 letih meritev pridobila Agencija RS za okolje in so prosto dostopni na spletni strani Agencije (http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php) (slika 4.13). Več informacij o lokaciji postaj, kjer so se izvajale vsakodnevne ter občasne meritve, in ostalih lastnostih vodomernih postaj je podanih v prilogi G ter prilogi D.



Slika 4.13: Povprečne vrednosti časovnega zamika med konico koncentracij suspendiranih snovi in konico pretoka (povzeto po Bezak in sod. (2015c))

Figure 4.13: Average lag values between maximum suspended sediment concentration values and peak discharge values (adapted from Bezak in sod. (2015c))

Na podlagi terenskih meritev z visoko frekvenco vzorčenja (poglavje 4.1) smo ugotovili, da do nastopa koncentracije suspendiranih snovi v veliki večini primerov pride pred nastopom konice pretoka. Časovne razlike so v tem primeru relativno majhne in večinoma ne presegajo trajanj nekaj ur, kar je glede na velikost eksperimentalnega porečja pričakovano. Te ugotovitve smo potrdili z uporabo podatkov prikazanih v prilogi D. Z upoštevanjem podatkov o pretokih in koncentracijah suspendiranih snovi z dnevnim korakom vzorčenja z več kot 25 vodomernih postaj v Sloveniji smo ugotovili, da konica pretoka večinoma nastopi za konico koncentracij suspendiranih snovi (pozitivne vrednosti prikazane na sliki 4.13). Tudi v tem primeru so bile

časovne razlike relativno majhne (v povprečju manj kot 1 dan) (slika 4.13), kar ponovno ni presenetljivo, saj se v Sloveniji monitoring večinoma izvaja na manjših do srednje velikih porečjih (priloga D). Natančnejši opis metodologije za določitev rezultatov prikazanih na sliki 4.13 je podan v prilogi D. Ob tem je potrebno dodati, da bi za zanesljivejše zaključke o povezanosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi s procesi površinskega odtoka vode, potrebovali več meritev z manjšim časovnim korakom vzorčenja.

Posledično to pomeni, da so za večino dogodkov značilne pozitivne histereze, ki so nekoliko podrobneje opisane v poglavju 4.1 ter v (priloga D).

Ker se meritve koncentracij suspendiranih snovi pogosto izvajajo manj pogosto kot meritve pretokov ali meritve padavin, in je v nekaterih primerih potrebno oceniti masne bilance premeščenih suspendiranih ter rinjenih plavin, se za ocenjevanje vrednosti suspendiranih snovi uporabi funkcija, ki povezuje to spremenljivko z vrednostmi pretokov. Zato smo izračunali tudi vrednosti Pearsonovega koeficienta korelacije med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi in ugotovili, da so bile izračunane vrednosti med 0,05 in 0,59 (priloga D). Relativno nizke vrednosti izbranega koeficienta korelacije so lahko posledica različnih procesov, opisanih v poglavju 4.1, kot so črpanje sedimentov, pozitivna oziroma negativna histereza ter fenomen prvega vala. To pomeni, da je uporaba krivulj pretok-koncentracije suspendiranih snovi (Rodriguez-Blanco in sod., 2010; Harrington in Harrington, 2013) za ocenjevanje morebitnih manjkajočih podatkov o fluvialnem premeščanju suspendiranih snovi na podlagi podatkov o pretokih v primeru slovenskih vodotokov relativno nezanesljiva. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi raziskovalci za vodotoke na različnih delih Evrope (Rodriguez-Blanco in sod., 2010). Tudi z uporabo podatkov, pridobljenih na eksperimentalnem porečju Kuzlovec smo ugotovili, da je raztros med podatki o pretokih in koncentracijah suspendiranih snovi relativno velik. Zato smo definirali model, kjer smo uporabili funkcije kopula, s katerim lahko vrednosti fluvialno premeščenih suspendiranih snovi v izbranem dogodku ocenimo na podlagi podatkov o pretokih in padavinah. Model je podrobneje opisan v poglavju 4.4.3 ter prilogi I in je bil uporabljen za oceno letno premeščenih suspendiranih snovi skozi prečni profil postaje Kuzlovec v obdobju med junijem 2013 in junijem 2014 (poglavje 4.1.1).

4.2.2 Trendi v obravnavanih hidroloških spremenljivkah

Nadalje smo na vodomernih postajah, kjer so se meritve koncentracij suspendiranih snovi izvajale zvezno v daljšem časovnem obdobju, analizirali tudi prisotnost trendov v časovnih serijah koncentracij suspendiranih snovi. Uporabili smo test Mann-Kendall, ki je opisan v poglavju 3.3.1. Ugotovili smo, da je za približno polovico postaj značilen pozitiven trend, za drugo polovico analiziranih postaj pa negativen trend, vendar so bili vsi statistično značilni trendi negativni. Preglednica 4.1 prikazuje rezultate testa Mann-Kendall s pripadajočimi stopnjami značilnosti za vzorec letnih maksimumov koncentracij suspendiranih snovi (Bezak in sod., 2015c). Več rezultatov je v prilogi D. Potencialni razlogi za zmanjševanje fluvialno premeščenih suspendiranih snovi so: izgradnja čistilnih naprav, zapiranje nekaterih rudnikov ter usedanje sedimentov v akumulacijskih bazenih hidroelektrarn. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi raziskovalci (Walling in Fang, 2003). Več rezultatov testov Mann-Kendall in njihova interpretacija je podanih v prilogi D.

Prisotnost sprememb v časovnih serijah smo z uporabo testa Mann-Kendall iskali tudi v podatkih o pretokih in padavinah (priloga C in priloga D). Podobno kot pri koncentracijah suspendiranih snovi, tudi v primeru pretokov nismo uspeli določiti ali pozitivnega ali negativnega trenda v analiziranih časovnih serijah (priloga C in priloga D). Ena izmed pomembnejših ugotovitev pa je bila, da so rezultati statističnih testov lahko izrazito odvisni od izbrane metodologije za določitev vzorca (npr. AM metoda ali POT metoda, ki sta opisani v poglavju 3.3.2). Priloga C

vsebuje dodatne informacije o prej omenjeni ugotovitvi.

Preglednica 4.1: Rezultati testa Mann-Kendall s pripadajočimi stopnjami značilnosti za časovne serije letnih maksimumov koncentracij suspendiranih snovi (*SSC*) (povzeto po Bezak in sod. (2015c))

Table 4.1: The Mann-Kendall test results with the corresponding significance levels for the annual maximum sample of the suspended sediment concentration (*SSC*) values (adapted after Bezak in sod. (2015c))

Postaja	Vodotok	Obdobje	AM- <i>SSC</i>
Gornja Radgona	Mura	1977-2005	0.36 (27.9)
Petanjci	Mura	1956-1973	-1.63 (89.7)
Polana	Ledava	1963-1973	-2.88 (99.6)
Ranca	Pesnica	1967-1973	0.15 (11.9)
Zamušani	Pesnica	1967-1973	-1.52 (87.1)
Šentjakob	Sava	1955-1973	-0.18 (13.9)
Šentjakob	Sava	1978-1993	-1.17 (75.8)
Hrastnik	Sava	1997-2006	0.45 (34.5)
Radeče	Sava	1955-1973	-0.56 (42.5)
Radeče	Sava	1975-1993	0.53 (40.2)
Veliko Širje	Savinja	1955-1973	-2.90 (99.6)
Veliko Širje	Savinja	1978-1989	1.51 (86.9)
Veliko Širje	Savinja	1994-2005	-0.69 (50.7)
Kobarid	Soča	1962-1973	-2.88 (99.6)
Miren	Vipava	1985-2005	1.57 (88.4)

4.2.3 Sezonske značilnosti opazovanih hidroloških procesov

Za analize sezonskosti smo uporabili metode, prikazane v poglavju 3.3.1. Rezultati kažejo, da so sezonske značilnosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi odvisne od sezonskih karakteristik pretokov. Večinoma konice koncentracij suspendiranih snovi nastopijo ali poleti kot posledica poletnih neviht ali jeseni kot posledica frontalnih padavin. Preglednica 4.2 prikazuje rezultate sezonskih značilnosti koncentracij suspendiranih snovi, kjer je več informacij o metodologiji podanih v prilogi D. Nadalje so najnižje koncentracije večinoma značilne za zimsko obdobje, ko je površje pogosto pokrito s snegom, in snežne padavin nimajo takšne erozijske moči kot npr. poletne nevihte. Dodatna pojasnila o analizah sezonskosti za postaje, kjer so se meritve izvajale v okviru državnega hidrološkega monitoringa, so podana v prilogi D. Ugotovitve pridobljene na mreži slovenskih vodotokov smo potrdili tudi z meritvami in opazovanji na eksperimentalnem porečju reke Gradaščice, kjer je poletna nevihta, ki se je zgodila v noči s 4. na 5. avgust 2014, povzročila intenzivne procese sproščanja, premeščanja in odlaganja sedimentov (poglavje 4.1).

Bezak in sod. (2015b) so analizirali sezonsko obnašanje pretokov v slovenskih vodotokih na podlagi podatkov s 50 vodomernih postaj, kjer je bil koeficient sezonskosti eden izmed parametrov za razdelitev postaj v šest homogenih skupin. Dodatne informacije o sezonskih značilnostih nekaterih postaj so podane tudi v prilogi D, kjer so bile analizirane postaje, kjer se izvajajo meritve koncentracij suspendiranih snovi, ter v prilogi C, kjer so bili analizirani podatki z vodomerne postaje Litija na reki Savi, ki je ena izmed najstarejših postaj v Sloveniji in kjer so se meritve pretokov začele izvajati že pred letom 1900.

Preglednica 4.2: Prikaz sezonskih maksimumov koncentracij suspendiranih snovi (povzeto po Bezak in sod. (2015c))

Table 4.2: Presentation of seasons with the highest suspended sediment concentration values (adapted after Bezak in sod. (2015c))

Postaja	Vodotok	Obdobje	Maks-SSC
Gornja Radgona	Mura	1977-2005	Poletje
Petanjci	Mura	1956-1973	Pomlad
Polana	Ledava	1963-1973	Zima
Ranca	Pesnica	1967-1973	Poletje
Zamušani	Pesnica	1967-1973	Pomlad
Šentjakob	Sava	1955-1973	Zima
Šentjakob	Sava	1978-1993	Jesen
Hrastnik	Sava	1997-2006	Jesen
Radeče	Sava	1955-1973	Poletje
Radeče	Sava	1975-1993	Jesen
Veliko Širje	Savinja	1955-1973	Poletje
Veliko Širje	Savinja	1978-1989	Poletje
Veliko Širje	Savinja	1994-2005	Jesen
Kobarid	Soča	1962-1973	Poletje
Miren	Vipava	1985-2005	Jesen

4.3 Rezultati modeliranja erozije tal

Za modeliranje erozije tal je bil uporabljen prosto dostopni model WATEM/SEDEM, ki je opisan v poglavju 3.4.2 ter v prilogi F.

4.3.1 Masne bilance fluvialno premeščenih suspendiranih snovi

Za vodomerne postaje, kjer so se meritve koncentracij suspendiranih snovi zvezno izvajale daljše časovno obdobje (poglavje 3.2.2), smo določili tudi masne bilance fluvialno premeščenih suspendiranih snovi. V prilogi D so prikazane vrednosti masnih bilanc [t/leto] za več kot 10 vodomernih postaj v Sloveniji. Specifične vrednosti fluvialno premeščenih suspendiranih snovi so znašale med 0,31 in 1,2 t/ha/leto (preglednica 4.3 in priloga D in priloga G). Pri tem je potrebno poudariti, da so to povprečne številke, ki so lahko določeno leto višje in naslednje leto precej nižje. Poleg tega te ocene ne vsebujejo doprinosa rinjenih plavin, ki lahko v primeru hudourniških vodotokov prispevajo med 20 in 90 % k skupni bilanci premeščenih rinjenih ter lebdečih plavin (Lenzi in Marchi, 2000). Več informacij o relativno redkih meritvah rinjenih plavin v slovenskih vodotokih je podanih v prilogi F.

Z uporabo modela za ocenjevanje količine premeščenih suspendiranih snovi v določenem dogodku, ki je opisan v poglavju 4.4.3, smo na podlagi podatkov o pretokih in padavinah ocenili, da se je med junijem 2013 in junijem 2014 skozi prečni profil postaje Kuzlovec premestilo približno 5 t suspendiranega materiala, kjer pa je šlo za obdobje brez izrazitih erozijskih procesov. Vendar se je nato avgusta 2014 zgodil dogodek, kjer so količine sproščenega drobno in grobo zrnatega materiala nekaj velikostnih razredov (približno 400 m³ na manjšem območju v velikosti približno 25*160 metrov) presegale prej omenjene vrednosti (poglavje 4.1.2).

4.3.2 Potencialno sproščanje

Vrednosti prikazane v poglavju 4.3.1 so predstavljale osnovo za oceno skupne količine plavin, ki jih slovenski vodotoki premeščajo. Te ocene, ki so prikazane v prilogi F, so bile uporabljene kot eden izmed vhodnih podatkov pri modeliranju erozije tal z uporabo modela WATEM/SEDEM. Opis modela WATEM/SEDEM je podan v poglavju 3.4.2. Modeliranje je bilo izvedeno za 5

Preglednica 4.3: Prikaz nekaterih osnovnih značilnosti obravnavanih postaj (povzeto po Bezak in sod. (2015c))

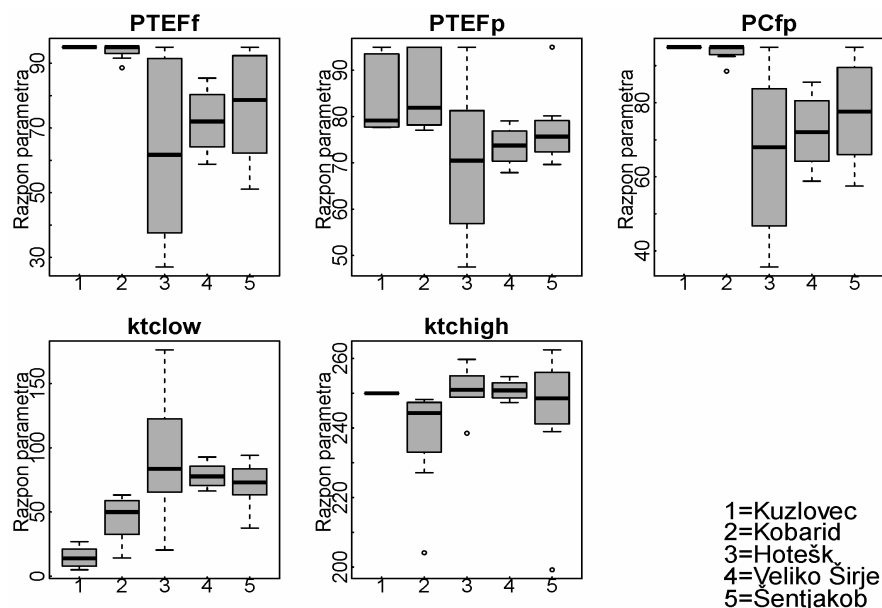
Table 4.3: Basic properties of the selected gauging stations (adapted after Bezak in sod. (2015c))

Postaja	Obdobje	Povprečni dnevni pretok m ³ /s	Povprečna dnevna SSC vrednost g/m ³
Gornja Radgona	1977-2005	150,7	49,5
Petanjci	1956-1973	171,7	111,0
Polana	1963-1973	1,6	140,7
Ranca	1967-1973	1,1	55,1
Zamušani	1967-1973	5,8	47,6
Šentjakob	1955-1973	97,5	23,9
Šentjakob	1978-1993	84,3	23,8
Hrastnik	1997-2006	152,7	24,0
Radeče	1955-1973	232,3	84,1
Radeče	1975-1993	209,0	69,5
Veliko Širje	1955-1973	45,6	54,5
Veliko Širje	1978-1989	45,3	51,3
Veliko Širje	1994-2005	39,9	46,8
Kobarid	1962-1973	35,1	19,3
Miren	1985-2005	16,7	19,0

porečij v Sloveniji, ki skupaj pokrivajo približno 20 % celotne površine Slovenije. Kot vhodne podatke smo uporabili digitalni model višin z natančnostjo 20 m, karto erozivnosti padavin (Petan, 2010), karto erodibilnosti zemljin, karto rabe tal ter ocene letno premeščenih plavin (priloga F). Za kalibracijo modela WATEM/SEDEM smo uporabili prosto dostopni programski paket PEST, ki se pogosto uporablja za kalibracijo hidroloških modelov (Kotar, 2013). Z uporabo orodij PEST smo izvedli tudi občutljivostno analizo (*ang.* sensitivity analysis), kjer smo ugotovili, da imajo parametri WATEM/SEDEM modela, ki so vezani na računske celice, pri katerih je pokrovnost tal gozd, večji vpliv na končne izračune modela kot drugi parametri (npr. parametri, ki zajamejo vpliv pašnikov). Slika 4.14 prikazuje razpone parametrov v primeru, ko smo model WATEM/SEDEM umerili z uporabo orodij PEST (Bezak in sod., 2015d). Več informacij o občutljivostnih analizah ter kalibraciji modela WATEM/SEDEM je podanih v prilogi F.

Nadalje smo z uporabo modela WATEM/SEDEM določili povprečne letne vrednosti izgube tal za pet izbranih porečij. Modelirana povprečna vrednost izgube tal je znašala 2,2 t/ha/leto. Mikoš in Zupanc (2000) sta ocenila, da se v Sloveniji letno sprosti $\approx 5 \cdot 10^6$ m³ materiala, kar je $\approx 10 \cdot 10^6$ t. Glede na površino Slovenije (≈ 20.000 km²) lahko izračunamo, da je specifično sproščanje po oceni, ki sta jo naredila Mikoš in Zupanc (2000), enako približno 5 t/ha/leto. Opazimo lahko, da se ta ocena ujema z modeliranimi vrednostmi, ki smo jih dobili z aplikacijo modela WATEM/SEDEM.

Te izračune smo primerjali tudi z rezultati modela PESERA (poglavje 3.4) in ugotovili, da so bile modelirane vrednosti z uporabo modela PESERA nižje, kot z uporabo modela WATEM/SEDEM, vendar v istem velikostnem razredu (priloga F). Do odstopanj je prišlo zaradi različne prostorske ločljivosti obeh modelov, različnih vhodnih podatkov, različne osnove obeh modelov ter ali je bil model kalibriran glede na dejanske izmerjene podatke ali kalibracije sploh ni bilo. Podrobneje so razlike med prej omenjenima modeloma razložene v prilogi F.



Slika 4.14: Razponi parametrov umerjenega modela WATEM/SEDEM z uporabo orodij PEST (povzeto po Bezak in sod. (2015d))

Figure 4.14: Parameter ranges for the calibrated WATEM/SEDEM model parameters, which were determined using the automatic parameter estimation procedure (PEST) (adapted from Bezak in sod. (2015d))

4.3.3 Koeficient odplavljanja

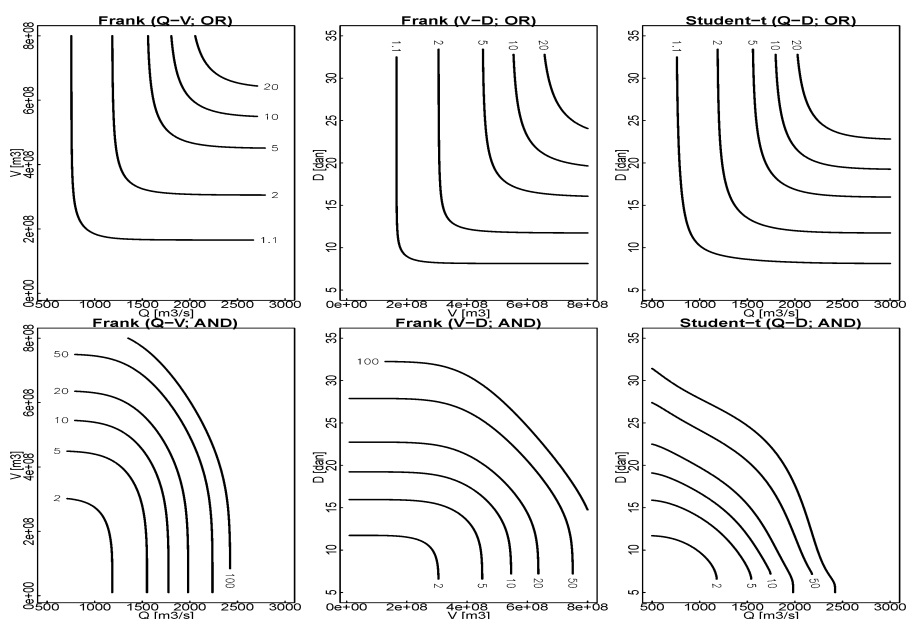
Na podlagi rezultatov prikazanih v poglavjih 4.3.1 in 4.3.2 smo izračunali tudi koeficient odplavljanja, ki predstavlja razmerje med dejanskimi izmerjenimi oziroma ocenjenimi količinami premeščenih plavin in potencialnimi letnimi količinami erodiranega materiala določenimi z uporabo modela WATEM/SEDEM (Ferro in Minacapilli, 1995; Lu in sod., 2006; Walling, 1983). Izračunane vrednosti za 5 območij v Sloveniji so se gibale med 0,07 ter 0,22 (priloga F). Ugotovili smo, da se koeficient odplavljanja zmanjšuje s povečevanjem prispevnega območja, kar pomeni, da pri večjih porečjih manj erozijsko sproščenega materiala prispe do struge vodotoka, saj večje porečje večinoma vsebuje več lokalnih depresij, kjer lahko prihaja do odlaganja materiala. Negativna zveza med koeficientom odplavljanja in velikostjo porečja sicer ni bila tako izrazita kot v nekaterih drugih študijah (Ferro in Minacapilli, 1995; Lu in sod., 2006), kar lahko pripišemo dejstvu, da bi za zanesljivejšo oceno o prej omenjeni povezavi modeliranje erozije tal morali narediti na več porečjih različnih velikosti, kar pa zaradi omejitev v količini podatkov o premeščanju plavin ni bilo mogoče, saj zanesljivi podatki z drugih vodotokov v Sloveniji niso na razpolago. Razlogi so: ali se meritve koncentracij suspendiranih snovi ter rinjenih plavin sploh niso izvajale ali pa so bile meritve zgolj občasne in posledično ne moremo narediti zanesljive ocene o bilancah letno premeščenih plavin, saj je raztros med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi pogosto prevelik (poglavje 4.2.1). Več informacij o izračunanih koeficientih odplavljanja je na voljo v prilogi F.

4.4 Uporaba funkcij kopula

Funkcije kopula se v zadnjem desetletju vse pogosteje uporabljajo v hidrološki praksi (Bezak in sod., 2014a) in so nekoliko podrobneje opisane v poglavju 3.3.3, v prilogi B in v prilogi E. Joe (1997), Nelsen (2006) ter Salvadori in sod. (2007) pa podajajo osnovne informacije o funkcijah kopula in njihovih značilnostih.

4.4.1 Rezultati multivariatnih verjetnostnih analiz visokovodnih valov

Funkcije kopula smo uporabili za multivariatne verjetnostne analize podatkov o pretokih, volumnih visokovodnih valov ter trajanjih visokovodnih valov. Uporabljeni so bili podatki z vodomerne postaje Litija na reki Savi. Postopek izvedbe bivariatnih verjetnostnih analiz je podrobneje opisan v prilogi E. Na podlagi rezultatov analiz smo ugotovili, da je bila kopula Gumbel-Hougaard iz Arhimedove družine kopul najustreznejša za modeliranje parov konice pretokov in volumnov visokovodnih valov ter volumnov visokovodnih valov in trajanj visokovodnih valov, medtem ko je bila Student- t kopula izbrana za sočasno analizo podatkov o pretokih in trajanjih visokovodnih valov. Nadalje pa smo iz vrednotili tudi različne vrednosti povratnih dob, ki so posebej definirane za multivariatne primere (priloga E). Slika 4.15 prikazuje povezavo med multivariatnimi povratnimi dobami in ocenjenimi vrednostmi spremenljivk, kjer je več informacij o metodologiji podanih v prilogi E.



Slika 4.15: Povezava med povratnimi dobami (OR in AND) in ocenjenimi vrednostmi spremenljivk (povzeto po Šraj in sod. (2015))

Figure 4.15: Joint return period values for OR and AND cases for the analysed pairs (adapted from Šraj in sod. (2015))

4.4.2 Rezultati multivariatnih analiz konic pretokov, volumnov valov ter koncentracij suspendiranih snovi

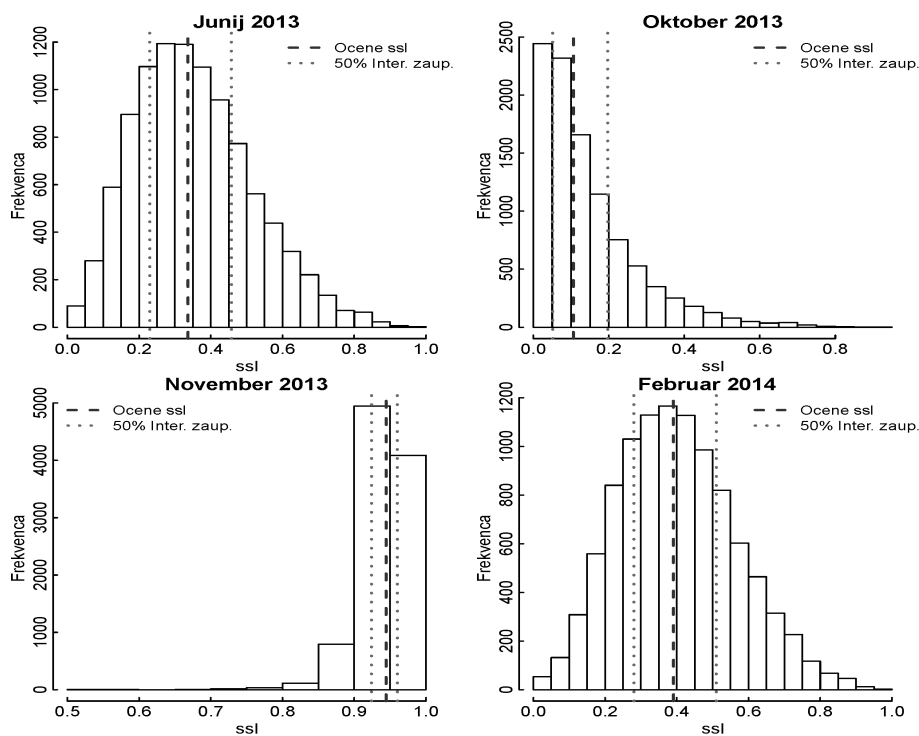
V prilogi B je podanih več informacij o trivariatni verjetnostni analizi podatkov o pretokih, volumnih visokovodnih valov ter koncentracijah suspendiranih snovi. Za izvedbo analiz so bili uporabljeni podatki, pridobljeni v okviru državnih hidroloških monitoringov v Sloveniji in ZDA (poglavje 3.2.2). Za izvedbo multivariatnih verjetnostnih analiz so bile uporabljene simetrične in asimetrične različice funkcij kopula, ki so bile izbrane glede na odvisnosti med prej omenjenimi spremenljivkami. Podobno kot v poglavju 4.4.1 smo z uporabo statističnih in grafičnih testov ugotovili, da je najustreznejše rezultate dala kopula Gumbel-Hougaard. Poleg tega smo ugotovili, da so asimetrične različice kopul v nekaterih primerih lahko ustreznejše kot simetrične funkcije kopula, saj imajo en parameter več in lahko posledično bolje opišejo odvisnost med različnimi spremenljivkami. Določili pa smo tudi povezavo med primarnimi in sekundarnimi vrednostmi povratnih dob in ocenjenimi vrednostmi vseh treh spremenljivk. Ta povezava bi lahko bila uporabna pri načrtovanju različnih objektov. Nekoliko razširjen opis metodologije in analize

rezultatov je na voljo v prilogi B.

4.4.3 Rezultati ocenjevanja suspendiranih snovi z uporabo kopul

Poleg prikazanih analiz smo funkcije kopula uporabili tudi za ocenjevanje vrednosti premeščenih suspendiranih snovi na podlagi podatkov o pretokih in padavinah (priloga I). Za ta namen smo uporabili podatke z eksperimentalnega porečja Kuzlovec, ki je opisano v poglavju 3.2.1. Ker se meritve motnosti niso izvajale zvezno smo z uporabo kopul definirali model s katerim lahko na podlagi znanih podatkov o konici pretoka in vsoti padavin za izbran dogodek ocenimo vrednosti suspendiranih snovi, saj smo ti dve spremenljivki opazovali z zveznimi meritvami. Dogodke smo definirali na podlagi padavinskih dogodkov, dva zaporedna dogodka pa sta bila ločena, če je bilo med njima več kot 6 urno obdobje brez padavin. Več informacij o metodologiji določanja dogodkov je podanih v prilogi I.

V modelu smo uporabili kopulo Gumbel-Hougaard, ki je v aplikacijah, prikazanih v poglavju 4.4.1 in v poglavju 4.4.2, dala najboljše rezultate. Ker je bila odvisnost med pari spremenljivk vsota padavin, konica pretoka in vsota premeščenih suspendiranih snovi skoraj popolnoma enaka, smo se odločili za uporabo simetrične funkcije kopula. Parametre modela, ki so dejansko parametri robnih porazdelitvenih funkcij in funkcije kopula, smo ocenili na podlagi 21 izmerjenih dogodkov (slika 4.16).



Slika 4.16: Porazdelitev ocenjenih *SSL* vrednosti in 50 % intervalov zaupanja za štiri dogodke, ki so se zgodili v različnih letnih časih

Figure 4.16: Distribution of estimated *SSL* values and 50 % confidence intervals for four events, which happened in different seasons

Z uporabo definirane modela smo nato na podlagi izmerjenih vrednosti konic pretokov in vsote padavin ocenili vrednosti premeščenih suspendiranih snovi (*SSL*) za dogodke, ko se dejanske meritve motnosti niso izvajale. Slika 4.16 prikazuje ocenjene vrednosti *SSL* za štiri izbrane dogodke v različnih letnih časih, ko se meritve koncentracij suspendiranih snovi niso izvajale. Več informacij o metodologiji za določitev slike 4.16 je prikazanih v prilogi I. Rezultate ocenjevanja smo primerjali z ocenami, ki smo jih določili z uporabo multiple linearne regresije (*ang.* multiple

linear regression), in ugotovili, da je prikazana metodologija z uporabo funkcij kopula dala bolj smiselne rezultate, saj smo pri uporabi multiple linearne regresije pri nekaterih dogodkih dobili negativne ocenjene vrednosti premeščenih suspendiranih snovi, kar seveda ni smiselno.

Opisan model je potrebno preveriti še na podatkih z drugih porečij in ga primerjati še z nekaterimi metodami za ocenjevanje vrednosti suspendiranih snovi. Več informacij o rezultatih ocenjevanja fluvialno premeščenih suspendiranih snovi je podanih v prilogi I.

5 SKLEPI

V doktorski disertaciji smo opisali rezultate terenskih hidroloških meritev, izvedenih na manjšem eksperimentalnem porečju, ki je del porečja reke Save. Različne meteorološke in hidrološke podatke smo analizirali s številnimi matematično-statističnimi orodji, med drugim smo uporabili funkcije kopula, ki smo jih aplicirali na hidrološke podatke. Z uporabo modela WATEM/SEDEM smo modelirali erozijo tal in določili razmerje med potencialnimi količinami erodiranega materiala in dejanskimi vrednostmi suspendiranih in rinjenih plavin, ki jih vodotoki premeščajo. Vsebina disertacije se prepleta z vsebino člankov, ki so podani kot priloge (priloga A, priloga B, priloga C, priloga D, priloga E, priloga F, priloga G, priloga H, priloga I). Na podlagi prikazanih rezultatov (poglavje 4) in delovnih hipotez (poglavje 1) lahko zapišemo naslednje ugotovitve.

- **Hipoteza 1:** *hidrometeorološki pojavi velikih intenzitet (močne lokalne padavine) imajo nadpovprečen vpliv na vrednosti koncentracij suspendiranih snovi, ki jih vodotoki premeščajo ter maksimalne koncentracije suspendiranih snovi večinoma nastopijo pred konico poplavnega vala (nastopom maksimalnega pretoka).*

Sklepi: izrazito nadpovprečni padavinski dogodki, za katere je značilna velika erozijska moč, imajo izredno velik vpliv na procese sproščanja, premeščanja in odlaganja erozijskega materiala in posledično tudi na vrednosti koncentracij suspendiranih snovi, ki jih vodotoki premeščajo. Količine premeščenega materiala ob takih ekstremnih dogodkih lahko nekaj velikostnih razredov presegajo vrednosti, ki se skozi določen prečni profil vodotoka premestijo v daljšem časovnem obdobju (npr. mesec, leto ali celo desetletje). Nadalje, do nastopa konice koncentracij suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih v povprečju pride pred nastopom konice pretoka, kjer so časovne razlike večinoma v časovnem razponu velikosti 1 dneva. Ta ugotovitev je bila potrjena tako z meritvami z visoko frekvenco vzorčenja (20 in 30 minut) kot z meritvami z dnevnim korakom zajema podatkov. Ta dognanja se ujemajo z ugotovitvami, ki so zapisane v svetovni literaturi, kjer so časovni zamiki odvisni od lokalnih razmer, kot so npr. velikost porečja, topografske, geološke, pedološke, klimatološke in hidrološke značilnosti obravnavanih območij.

- **Hipoteza 2:** *koeficient odplavljanja, ki predstavlja razmerje med dejanskimi izmerjenimi količinami lebdečih plavin (ocenjene letne količine fluvialno premeščenih suspendiranih snovi), in med potencialnimi letnimi količinami erodiranega materiala, določenega z uporabo empiričnega modela erozije tal (npr. USLE, RUSLE), je odvisen od velikosti porečja.*

Sklepi: na podlagi rezultatov modeliranja erozije tal z uporabo modela WATEM/SEDEM in dejanskih vrednosti premeščenih plavin za 5 porečij v Sloveniji smo ugotovili, da se koeficient odplavljanja zmanjšuje z večanjem prispevnega območja, vendar odvisnost ni bila zelo izrazita, kar lahko pripišemo dejstvu, da je povezava med sproščanjem, premeščanjem in odlaganjem odvisna od številnih dejavnikov. Razgiban relief, relativno gosta hidrološka mreža in hudourniški značaj večine slovenskih vodotokov so dejavniki, ki med drugim vplivajo na koeficient odplavljanja, ki ima v primeru zelo velikih porečij ($\geq 10.000 \text{ km}^2$) z ravninsko topografijo, drugačne značilnosti.

- **Hipoteza 3:** *z uporabo funkcij kopula lahko hkrati analiziramo vrednosti konic pretokov, volumnne visokovodnih valov ter koncentracije suspendiranih snovi.*

Sklepi: v okviru doktorske disertacije smo pokazali, da lahko z uporabo funkcij kopula hkrati analiziramo konice pretokov, volumnne visokovodnih valov ter koncentracije suspendiranih snovi, poleg tega pa smo z uporabo funkcij kopula definirali tudi model, s katerim lahko na podlagi podatkov o konici pretoka in vsoti padavin brez meritev ocenimo količino fluvialno premeščenih suspendiranih snovi v izbranem dogodku.

Poleg tega se v zadnjih desetletjih (približno od 1960 do 2010) vrednosti fluvialno premeščenih suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih nekoliko zmanjšujejo, kar bi lahko bila posledica gradnje čistilnih naprav, zapiranja rudnikov in povečanja površine območij pokritih z gozdom, ki je posledica opuščanja kmetijstva in urbanizacije. Nadalje lahko največje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi izmerimo ali poleti kot posledico poletnih neviht ali jeseni kot posledico več dni trajajočih frontalnih padavin, ki se v zadnjem desetletju ali dveh pojavljajo pogosteje, zaradi sprememb v letni razporeditvi padavin.

Pridobljeni rezultati se lahko uporabijo pri načrtovanju hidrotehničnih objektov (določitev zveze med ocenjenimi vrednosti spremenljivk in povratnimi dobami z uporabo funkcij kopula), pri učinkovitejšem obratovanju hidroelektrarn (poznavanje zveze med pretoki in koncentracijami suspendiranih snovi), zasnovi hidrološkega monitoringa (poznavanje zakonitosti in značilnosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi) in načrtovanju ukrepov za zmanjševanje erozijske ogroženosti (modeliranje erozije tal z uporabo modela WATEM/SEDEM).

Na podlagi pridobljenih rezultatov in ugotovitev lahko zapišemo tudi nekaj predlogov za nadaljnje delo:

- postavitve merske opreme za opazovanje erozijskih procesov na nivoju pobočja;
- uporaba modela WATEM/SEDEM in orodij PEST za prostorsko umerjanje in nadaljnje modeliranje erozije tal;
- uporaba kopul na časovnih vrstah, ocenjevanje nemerjenih spremenljivk in poskus izgradnje hidrološkega modela padavine-odtok z uporabo funkcij kopula.

6 POVZETEK

Razumevanje in poznavanje procesov, ki sestavljajo vodni oziroma hidrološki ter erozijsko-sedimentacijski krog, ki se medsebojno prepletata, je pomembno z vidika varstva pred naravnimi nesrečami, zagotavljanja ustreznih pogojev za življenje (npr. pitna voda) ter številnih drugih dejavnikov. V doktorski disertaciji so obravnavani naslednji procesi: fluvialno premeščanje suspendiranih snovi, površinski odtok vode, padavine ter erozijski procesi. Disertacija je strukturirana v obliki monografije, vendar se vsebina disertacije prepleta z vsebino člankov, ki so k disertaciji dodani kot priloge (6 člankov objavljenih v revijah s faktorjem vpliva (IF), 2 članka objavljena v slovenskih revijah ter 1 članek, ki je oddan v revijo z IF).

V uvodnem poglavju disertacije je podan opis problematike in predstavitev relevantnosti problema, zapisane so postavljene 3 hipoteze, ki smo jih pri raziskovalnem delu preverjali, ter opisani so nekateri drugi cilji doktorske disertacije.

V disertaciji so najprej opisani in predstavljeni hidrološki procesi (sproščanje, premeščanje, odplavljanje zemljin ter povezanih hidroloških procesov), sledi opis merskih metod, ki so bile uporabljene za izvedbo meritev (meritve padavin, pretokov, fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi ter erozijskih procesov). Nadalje je podan opis obravnavanih porečij vključno z eksperimentalnim porečjem, kjer so se meritve z visoko frekvenco vzorčenja izvajale v okviru doktorske disertacije (Kuzlovec, ki je del porečja Gradaščice), sledi opis uporabljenih statistično-matematičnih metod (metoda letnih maksimumov, metoda vrednosti nad izbranim pragom, metode za analizo sezonskosti ter trendov), ki so bile uporabljene za analizo podatkov, pri tem je poudarek na funkcijah kopula, ki omogočajo hkratno analizo dveh ali več v naravi bolj ali manj odvisnih spremenljivk. V zadnjem delu prvega dela disertacije pa so prikazane osnove modeliranja erozije tal s poudarkom na modelu WATEM/SEDEM. Poleg tega so prikazane nekatere v Sloveniji pogosto uporabljene metode za ovrednotenje erozije tal.

V drugem delu disertacije (rezultati in razprava) so prikazani rezultati različnih terenskih meritev (npr. meritve fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi, padavin, pretokov, erozije tal), izvedena je analiza povezanosti fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi (padavine in odtok), prikazani so rezultati modeliranja erozije tal ter uporabe funkcij kopul.

V zadnjem delu disertacije so prikazani bistveni sklepi ter nekatere ideje za nadaljnje delo. Ugotovili smo, da imajo padavinski dogodki velikih intenzitet nadpovprečen vpliv na procese sproščanja, premeščanja in odlaganja erozijskega materiala. Količine premeščenega materiala so lahko pri teh dogodkih nekaj velikostnih razredov večje od dolgoletnega povprečja. V Sloveniji do nastopa konice fluvialno premeščenih suspendiranih snovi večinoma prihaja pred nastopom konice pretoka, pri tem pa so časovne razlike večinoma relativno majhne (do 1 dneva). Te ugotovitve se ujema z zapisi v svetovni literaturi, kjer so raziskovalci med drugim ugotovili, da so časovni zamiki odvisni od velikosti porečja, topografskih, geoloških ter številnih drugih lastnosti porečij. Nadalje se količine fluvialno premeščenih suspendiranih snovi v slovenskih vodotokih večinoma zmanjšujejo, kar je lahko posledica različnih vzrokov, kot sta zaraščanje površja zaradi opuščanja kmetijske obdelave (urbanizacija) ter zapiranje rudnikov. Z aplikacijo modela WATEM/SEDEM na 5 porečjih (Kuzlovec, Kobarid, Hotešk, Veliko Širje, Šentjakob brez HE Moste) v Sloveniji je bilo ugotovljeno, da se koeficient odplavljanja zmanjšuje z večanjem prispevnega območja. Model WATEM/SEDEM smo umerili glede na izmerjene podatke suspendiranih ter rinjenih snovi z uporabo PEST orodij. Funkcije kopula pa so bile uporabljene za multivariatne verjetnostne analize poplavnih dogodkov, kjer smo hkrati upoštevali konice pretokov, volumne visokovodnih valov ter trajanja visokovodnih valov, poleg tega pa smo funkcije kopula uporabili tudi za analizo podatkov o suspendiranih snoveh ter za ocenjevanje vrednosti fluvialno preme-

ščenih suspendiranih snovi na podlagi podatkov o pretokih in padavinah (definirali smo model s katerim lahko ocenimo vrednosti fluvialno premeščenih suspendiranih snovi). Daljša razprava o nekaterih rezultatih ter dodatni zaključki so na voljo v priloženih člankih.

7 SUMMARY

Understanding and knowledge about the processes that define water or hydrologic cycle and erosion-sedimentation cycle (these two cycles are inter-connected) is important in order to ensure safety during natural disasters, to provide sufficient conditions for life (e.g. drinkable water) and also due to several others reasons. In the presented thesis we have dealt with next processes: fluvial transport of suspended sediments, surface runoff, rainfall and erosion processes. The thesis structure is the same as in case of monograph but the thesis content interacts with content of papers that are attached to the thesis (6 papers that were published in SCI journals, 2 papers that were published in Slovenian journals and 1 paper that was submitted to the SCI journal).

Introduction section includes description of problems connected with fluvial transport of suspended sediments and some related problems, 3 hypothesis that were tested during the research work are introduced and in the end some other aims are also presented.

Firstly, the investigated hydrological processes are described (erosion, transport and deposition of sediments and connected hydrological processes), then the measuring methods are presented (methods for measuring rainfall, discharge, fluvial transport of suspended sediment and erosion processes). Further, the investigated catchments including experimental catchment where high-frequency measurements were performed are described (Kuzlovec that is part of the Gradaščica River catchment), in the next section the statistical-mathematical tools that were used for data analysis are shown (annual maximum series method, peaks-over-threshold method and tools to analyse seasonality and trends in the time series). The emphasis was given to the copula functions that can be used for simultaneous study of two or more (in)dependent variables that define the environmental process. In the last section of the first part of thesis the basic concepts of soil erosion modelling are presented where the emphasis was given to the WATEM/SEDEM model that can be used for soil erosion modelling. Moreover, some other methods that were quite frequently used in Slovenia for soil erosion assessment are also presented.

In the second part of the thesis (results and discussion), results of field measurements are presented (e.g. measurements of fluvial transport of suspended sediments, rainfall, discharge and soil erosion), analysis of connection between fluvial transport of suspended sediments and other hydrological processes (rainfall and runoff) was carried out, soil erosion modelling results are described and application of copula functions is shown on practical examples.

In the last section of the thesis the main conclusions are presented and some ideas for further research work are described. The main conclusions are: rainfall events that have large rainfall intensities have significant impact on erosion, transport and deposition process. During these kinds of events the suspended sediment budgets can be for a few orders of magnitude larger than the long-term annual rates. In Slovenia the peak of the suspended sediment transport mostly occurs before the peak discharge but the time differences are rather small (up to 1 day). These conclusions are in agreement with findings that were made by other researchers who also found that time differences depend on catchment area, topographic, geological properties and several other factors. Moreover, the trends in the transport of suspended sediments in Slovenian streams are mostly negative (all statistically significant trends are negative). Reasons for this can be in closing of mines in Slovenia or increasing the forested areas that are consequence of abandoning of farming due to urbanisation. Application of the WATEM/SEDEM model (5 catchments in Slovenia: Kuzlovec, Kobarid, Hotešk, Veliko Širje, Šentjakob brez HE Moste) showed that sediment delivery ratio decreases with increasing catchment area. WATEM/SEDEM model was calibrated using measured suspended sediment and bed load data with application of the PEST tools. Copula functions were used for multivariate flood frequency analysis where peak discharge, hydrograph volume and hydrograph duration were considered in the analysis. Moreo-

ver, copula functions were also used to analyse suspended sediment data and for the estimation of the suspended sediment values based on the measured discharge and rainfall values (model that can be used to estimate suspended sediment loads was defined). Extended discussion about some results and additional conclusions can be found in the attached papers.

VIRI

- Ackers, P., White, W. 1973. Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of Hydraulics Division* 99, 11: 2040–2060.
- Alatorre, L. C., Begueria, S., Garcia-Ruiz, J. M. 2010. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology* 391, 1-2: 111–125. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.010.
- ArhivPV 2015. Ljubljana. Agencija Repulike Slovenije za okolje. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php.
- Bača, P. 2008. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences Journal* 53, 1: 224–235. doi:10.1623/hysj.53.1.224.
- Babić-Mladenović, M., Bekić, D., Grošel, S., Kupusović, T., Mikoš, M., Oskoruš, D., Damjanović, V., Ninković, D., Milačić, R., Petković, S. 2013. Towards Practical Guidance for Sustainable Sediment Management using the Sava River Basin as a Showcase (Estimation of Sediment Balance for the Sava River). Zagreb, International Sava River Basin Commission: 87 str.
- Bardossy, A., Pegram, G. 2013. Interpolation of precipitation under topographic influence at different time scales. *Water Resources Research* 49, 1: 4545–4565. doi:10.1002/wrcr.20307.
- Bezak, N., Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 2014a. Uporaba kopul v hidrologiji. *Raziskave s področja geodezije in geofizike-2014: zbornik predavanj* 20, 1: 7–22.
- Bezak, N., Grigillo, D., Rusjan, S., Šraj, M., Kozmus Trajkovski, K., Petrovič, D., Mikoš, M. 2015a. Sediment budget estimation in a small torrential catchment using DEM of difference approach. *European Geosciences Union, General Assembly 2015, Dunaj, Austria, 12 -17 april 2015*: 1 str.
- Bezak, N., Horvat, A., Šraj, M. 2015b. Analysis of flood events in Slovenian streams. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63, 2: 134–344. doi:10.1515/johh-2015-0014.
- Bezak, N., Mikoš, M., Šraj, M. 2014b. Trivariate Frequency Analyses of Peak Discharge, Hydrograph Volume and Suspended Sediment Concentration Data Using Copulas. *Water Resources Management* 28, 8: 2195–2212. doi:10.1007/s11269-014-0606-2.
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. 2013a. Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov. *Gradbeni vestnik* 62, 12: 274–280.
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. 2015c. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. *Hydrological Sciences Journal* doi:10.1080/02626667.2015.1006230.
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2013b. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. *Acta hydrotehnica* 26, 45: 85–97.
- Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. 2015d. Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environmental Earth Sciences* doi:10.1007/s12665-015-4534-0.
- Bilotta, G. S., Brazier, R. E. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research* 42, 12: 2849–2861. doi:10.1016/j.watres.2008.03.018.
- Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., Cazorzi, F. 2014. Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. *Catena* 123, 1: 23–36. doi:10.1016/j.catena.2014.07.001.

- Bogen, J., Bønsnes, T. E. 2001. The impact of a hydroelectric power plant on the sediment load in downstream water bodies, Svartisen, northern Norway. *Science of the Total Environment* 266, 1-3: 273–280. doi:10.1016/S0048-9697(01)00650-7.
- Box, G., Pierce, D. 1970. Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models. *Journal of the American Statistical Association* 65, 1: 1509–1526. doi:10.1080/01621459.1970.10481180.
- Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S. 2005. Eksperimentalna porečja v Sloveniji. Raziskave s področja geodezije in geofizike-2005: zbornik predavanj 11, 1: 47–59.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Penna, D., Borga, M., Matgen, P., Heitz, S. 2011. Investigation of the hydrologic response of three experimental basins across Europe. *Die Bodenkultur* 62, 1-4: 31–37.
- Burn, D. H. 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology* 202, 1-4: 212–230. doi:10.1016/S0022-1694(97)00068-1.
- Carrivick, J., Geilhausen, M., Warburton, J., Dickson, N., Carver, S., Evans, A., Brown, L. 2013. Contemporary geomorphological activity throughout the proglacial area of an alpine catchment. *Geomorphology* 188, 1: 83–95. doi:10.1016/j.geomorph.2012.03.029.
- Cvetko, P. 2013. Meritve pretokov vodotoka z dvema različnima instrumentoma. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cvetko): 62 str.
- De Sutter, R., Verhoeven, R., Krein, A. 2001. Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiments. *Hydrological Sciences Journal* 46, 4: 599–610. doi:10.1080/02626660109492853.
- Doherty, J., Johnston, J. M. 2003. Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *Journal of the American Water Resources Association* 39, 2: 251–265. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04381.x.
- Dolar, B. 2014. Suspendirani sedimenti v reki Dravi. *Gradbeni vestnik* 63, 4: 94–100.
- Douglas, E. M., Vogel, R. M., Kroll, C. N. 2000. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology* 240, 1-2: 90–105. doi:10.1016/S0022-1694(00)00336-x.
- Eder, A., Exner-Kittridge, M., Strauss, P., Blöschl, G. 2014. Re-suspension of bed sediment in a small stream – results from two flushing experiments. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 1: 1043–1052. doi:10.5194/hess-18-1043-2014.
- Evropski parlament in Svet EU 2000. Direktiva 2000/60/ES. Bruselj, Evropski parlament: 71 str.
- Ferro, V., Minacapilli, M. 1995. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 40, 6: 703–717. doi:10.1080/02626669509491460.
- Gavrilovič, S. 1970. Savremeni načini proračunavanja bujičnih nanosa i izrada karata erozije. Posvet Erozijska, bujični tokovi i rečni nanos. Beograd, Jugoslavija, Institut Jaroslav Černi: 85-100.
- GEATEH 2010. Študijsko-raziskovalna naloga: Plavine v zajezitvah verige hidroelektrarn na reki Savi. Ljubljana, HSE: 236 str.

- Geiger, R., Aron, R. H., Todhunter, P. 1995. *The Climate near the Ground*. Braunschweig/Wiesbaden, Friedr. Vieweg Sohn Verslagsgesellschaft mbH: 528 str.
- Genest, C., Favre, A. C. 2007. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering* 12, 4: 347–368. doi:10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:4(347).
- Genest, C., Remillard, B., Beaudoin, D. 2009. Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study. *Insurance Mathematics Economics* 44, 2: 199–213. doi:10.1016/j.insmatheco.2007.10.005.
- Gibson, S., Brunner, G., Piper, S., Jensen, M. 2006. Sediment transport computations with HEC-RAS. *PROCEEDINGS of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC)*. Reno, NV, USA, JFIC: 57-64.
- Graler, B., van den Berg, M. J., Vandenberghe, S., Petroselli, A., Grimaldi, S., De Baets, B., Verhoest, N. E. C. 2013. Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 4: 1281–1296. doi:10.5194/hess-17-1281-2013.
- Grant, R., Laubel, A., Kronvang, B., Andersen, H., Svendsen, L., Fuglsang, A. 1996. Loss of dissolved and particulate phosphorus from arable catchments by subsurface drainage. *Water Research* 30, 11: 2633–2642. doi:10.1016/S0043-1354(96)00164-9.
- Grigillo, D., Rusjan, S., Vrečko, A., Džebo, E., Kozmus, K., Urbančič, T., Petrovič, D., Mikoš, M. 2014. Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode. *Digitalni prostor (GIS v Sloveniji)*. Ljubljana, Slovenija, ZRC: 35-42.
- Grigillo, D., Vrečko, A., Mikoš, M., Gvozdanovič, T., Anžur, A., Vežočnik, R., Petrovič, D. 2015. Determination of large wood accumulation in a steep forested torrent using laser scanning. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*, Springer: 127-130.
- Grimaldi, S., Serinaldi, F. 2006. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis. *Advances in Water Resources* 29, 8: 1155–1167. doi:10.1016/j.advwatres.2005.09.005.
- Grubbs, F. E. 1950. Sample criteria for testing outlying observations. *Annals of Mathematical Statistics* 21, 1: 27–58. doi:10.1214/aoms/1177729885.
- Harrington, S. T., Harrington, J. R. 2013. An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland. *Geomorphology* 185, 1: 27–38. doi:10.1016/j.geomorph.2012.12.002.
- Hewlett, J. 1961. Soil moisture as a source of baseflow from steep mountain watersheds. *USDA, Forest Service* 132, 1: 1–11.
- Horton, R. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of American Geophysical Union* 14, 1: 446–460.
- Joe, H. 1997. *Multivariate models and dependence concepts*. London; New York, Chapman Hall: 480 str.
- Kendall, M. 1975. *Multivariate analysis*. London, Griffin: 210 str.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms and Processes. A New Perspective* London, Arnold: 383 str.
- Kotar, A. 2013. *Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave*. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Kotar): 75 str.

- Kryżanowski, A., Mikoš, M., Šušteršič, J., Ukrainczyk, V., Planinc, I. 2012. Testing of Concrete Abrasion Resistance in Hydraulic Structures on the Lower Sava River. *Journal of Mechanical Engineering* 58, 4: 245–254. doi:10.5545/sv-jme.2010.217.
- Lenzi, M. A., D'Agostino, V., Billi, P. 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment. *Catena* 36, 3: 171–190. doi:10.1016/S0341-8162(99)00016-8.
- Lenzi, M. A., Mao, L., Comiti, F. 2003. Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 48, 6: 899–915. doi:10.1623/hysj.48.6.899.51425.
- Lenzi, M. A., Mao, L., Comiti, F. 2006. When does bedload transport begin in steep boulder-bed streams? *Hydrological Processes* 20, 16: 3517–3533. doi:10.1002/hyp.6168.
- Lenzi, M. A., Marchi, L. 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39, 4: 267–282. doi:10.1016/s0341-8162(00)00079-5.
- Lu, H., Moran, C. J., Prosser, I. P. 2006. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environmental Modelling Software* 21, 9: 1297–1308. doi:10.1016/j.envsoft.2005.04.021.
- Malvar, M. C., Prats, S. A., Nunes, J., Keizer, J. 2011. Post-fire overland flow generation and inter-rill erosion under simulated rainfall in two eucalypt stands in north-central Portugal. *Environmental Research* 111, 2: 222–236. doi:10.1016/j.envres.2010.09.003.
- Mao, L., Lenzi, M. A. 2007. Sediment mobility and bedload transport conditions in an alpine stream. *Hydrological Processes* 21, 14: 1882–1891. doi:10.1002/hyp.6372.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., Jakeman, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling Software* 18, 8-9: 761–799. doi:10.1016/s1364-8152(03)00078-1.
- Meyer-Peter, B., Müller, T. 1948. Formulas for bed load transport. Report on Second Meeting of International Association for Hydraulics Research. Stockholm, IAHR: 39-64.
- MIKE 2015. DHI. Products-Sediments, <http://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/sediments>.
- Mikoš, M. 1994. Fluvialna abrazija v prodonosnih vodotokih. 1. del, Terensko raziskovanje procesov in njihov matematični opis. *Gradbeni vestnik* 43, 3-5: 68–76.
- Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric. *Gradbeni vestnik* 49, 9: 208–219.
- Mikoš, M. 2012a. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. *Gradbeni vestnik* 61, 6: 129–142.
- Mikoš, M. 2012b. Metode terenskih meritev suspendiranih sedimentov v rekah. *Gradbeni vestnik* 61, 7: 151–158.
- Mikoš, M. 2012c. Predlog obratovalnega hidrološkega monitoringa kalnosti na spodnji Savi. *Gradbeni vestnik* 61, 8: 170–176.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M. 2006. Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soca River Valley, Slovenia. *Engineering Geology* 86, 2-3: 198–210. doi:10.1016/j.enggeo.2006.02.015.

- Mikoš, M., Zupanc, V. 2000. Erozijska tal na kmetijskih površinah. *Sodobno kmetijstvo* 33, 1: 419–423.
- Nelsen, R. 2006. *An introduction to copulas*. Dordrecht, Springer: 272 str.
- Newcombe, C., Macdonald, D. 1991. Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management* 11, 1: 72–82. doi:10.1577/1548-8675(1991)011<0072:EOSSOA>2.3.CO;2.
- Norton, K., von Blanckenburg, F., DiBiase, R., Schlunegger, F., Kubik, P. 2011. Cosmogenic ¹⁰Be-derived denudation rates of the Eastern and Southern European Alps. *International Journal of Earth Sciences* 100, 5: 1163–1179. doi:10.1007/s00531-010-0626-y.
- Overeem, A., Leijnse, H., Uijlenhoet, R. 2011. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks. *Water Resources Research* 47, 1: 1–16. doi:10.1029/2010WR010350.
- Ovington, J. 1954. A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry London* 27:, 41-53.
- Panagos, P., Meusburger, K., van Liedekerke, M., Alewell, C., Hiederer, R., Montarella, L. 2014. Assessing soil erosion in Europe based on data collected through a European network. *Soil Science and Plant Nutrition* 60, 1: 15–29. doi:10.1080/00380768.2013.835701.
- Petan, S. 2010. Meritve in prostorsko modeliranje erozivnosti padavin kot parametra erozije tal. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Petan): 205 str.
- Petan, S. 2014. 24 urna vsota padavin ob 7:00 dne 5.8.2014 izmerjena z meteorološkim radarjem (ARSO). Agencija RS za okolje, Osebna komunikacija.
- Petkovšek, G. 2000. Procesno utemeljeno modeliranje erozije tal. *Acta hydrotehnica* 18, 28: 41–60.
- Petkovšek, G. 2002. Kvantifikacija in modeliranje erozije tal z aplikacijo na povodju Dragonje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Petkovšek): 205 str.
- Pintar, J., Mikoš, M. 1983. Izdelava smernic in normativov z globalno usmeritvijo urejanja po ekosistemih, pojavnostih in ekološki primernosti ter načinov gospodarjenja s povirji voda. Poročilo VGI. Ljubljana, VGI: 133 str.
- PovratneDP 2013. Ljubljana. Agencija RS za okolje (ARSO), Sektor za analize in prognoze površinskih voda, Urad za hidrologijo in stanje okolja: 33 str.
- Prats, S. A., Malvar, M. C., Vieira, D. C. S., MacDonald, L., Keizer, J. 2013. Effectiveness of hydromulching to reduce runoff and erosion in a recently burnt pine plantation in central Portugal. *Land Degradation Development* doi:10.1002/ldr.2236.
- Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107, 1: 89–102. doi:10.1016/j.marchem.2006.10.001.
- Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000. *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: 329 str.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D. 1997. *Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Washington, D.C.; USA, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service: 404 str.

- Rickenmann, D. 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering* 117, 11: 1419–1439. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:11(1419).
- Robichaud, P., Brown, R. 2002. Silt Fences: An Economical Technique for Measuring Hillslope Soil Erosion. http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr094.pdf, Fort Collins, USA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Technical Report RMRS-GTR-94, 24 p.
- Rodriguez-Blanco, M. L., Taboada-Castro, M. M., Palleiro, L., Taboada-Castro, M. T. 2010. Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology* 123, 1-2: 181–188. doi:10.1016/j.geomorph.2010.07.015.
- Ruark, M., Niemann, J., Greimann, B., Arabi, M. 2011. Method for Assessing Impacts of Parameter Uncertainty in Sediment Transport Modeling Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 137, 6: 623–636. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000343.
- Rusjan, S. 2008. Hidrološke kontrole sproščanja hranil v porečjih. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Rusjan): 206 str.
- Rusjan, S., Mikoš, M. 2006. Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih. *Acta hydrotehnica* 24, 40: 1–20.
- Sahin, S., Cigizoglu, H. K. 2010. Homogeneity analysis of Turkish meteorological data set. *Hydrological Processes* 24, 8: 981–992. doi:10.1002/hyp.7534.
- Salvadori, G., De Michele, C. 2004. Analytical calculation of storm volume statistics involving Pareto-like intensity-duration marginals. *Geophysical Research Letters* 31, 4: 1–4. doi:10.1029/2003gl018767.
- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N. T., Rosso, R. 2007. *Extremes in nature an approach using Copulas*. Dordrecht, Springer: 292 str.
- Savenije, H. H. G. 2010. Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo). *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 12: 2681–2692. doi:10.5194/hess-14-2681-2010.
- SedAlp 2015. SedAlp project. <http://www.sedalp.eu/index.shtml>, Alpine Space.
- Seibert, J., Beven, K. 2009. Gauging the ungauged basin: how many discharge measurements are needed? *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 6: 883–892. doi:10.5194/hess-13-883-2009.
- Seibert, J., Vis, M. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 9: 3315–3325. doi:10.5194/hess-16-3315-2012.
- Shi, Z. H., Ai, L., Fang, N. F., Zhu, H. D. 2012. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China. *Journal of Hydrology* 438, 1: 156–167. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.03.016.
- Skaberne, D. 2000. Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj pobočnega transporta. *Geologija* 44, 1: 89–100. doi:10.5474/geologija.2001.006.
- Smart, G., Jäggi, M. 1983. *Sedimenttransport in steilen Gerinnen*. Report 64. Zurich, ETH Zurich, der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie: 191 str.
- Soler, M., Latron, J., Gallart, F. 2008. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology* 98, 1-2: 143–152. doi:10.1016/j.geomorph.2007.02.032.

Šraj, M. 2003. Modeliranje in merjenje prestreženih padavin. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šraj): 236 str.

Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. 2012. Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji. *Acta hydrotehnica* 25, 42: 41–58.

Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. 2013. Primerjava med klasičnimi univariatnimi verjetnostnimi analizami in bivariatnimi z uporabo funkcije kopula. *Acta hydrotehnica* 26, 44: 37–48.

Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. 2015. Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River. *Hydrological Processes* 29, 2: 225–238. doi:10.1002/hyp.10145.

Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008a. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and forest meteorology* 148, 1: 121–134. doi:10.1016/j.agrformet.2007.09.007.

Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M. 2008b. The experimental watersheds in Slovenia. *IOP Conference Series* 4, 1: 1–13. doi:10.1088/1755-1307/4/1/012051.

Tena, A., Batalla, R. J., Vericat, D., Lopez-Tarazon, J. A. 2011. Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). *Geomorphology* 125, 1: 73–84. doi:10.1016/j.geomorph.2010.07.029.

Tramblay, Y., Saint-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Moatar, F., Hecht, B. 2010. Estimation of local extreme suspended sediment concentrations in California Rivers. *Science of the Total Environment* 408, 19: 4221–4229. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.05.001.

Turnipseed, D., Sauer, V. 2010. Discharge measurements at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/>, Reston, Virginia, USA, book 3, chap. A8, 87 p.

Uлага, F. 2005. Monitoring suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Acta hydrotehnica* 23, 39: 117–127.

Uлага, F. 2006. Transport suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Ujma* 20, 1: 144–150.

USDI 2015. SRH-1D. <http://www.usbr.gov/pmts/sediment/model/srh1d/index.html>, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

USGS 2015. United States Geological Survey-data. <http://nwis.waterdata.usgs.gov/usa/nwis/qwdata>.

Van Rompaey, A. J. J., Govers, G., Puttemans, C. 2002. Modelling land use changes and their impact on soil erosion and sediment supply to rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 5: 481–494. doi:10.1002/esp.335.

Vandenbergh, S., Verhoest, N. E. C., Onof, C., De Baets, B. 2011. A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events: A case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall. *Water Resources Research* 47, 1: 1–16. doi:10.1029/2009wr008388.

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G. 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change* 60, 3-4: 393–415. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.05.002.

- Verstraeten, G., Prosser, I. P. 2008. Modelling the impact of land-use change and farm dam construction on hillslope sediment delivery to rivers at the regional scale. *Geomorphology* 98, 3-4: 199–212. doi:10.1016/j.geomorph.2006.12.026.
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65, 1-3: 209–237. doi:10.1016/0022-1694(83)90217-2.
- Walling, D. E., Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39, 1-2: 111–126. doi:10.1016/s091-8181(03)00020-1.
- Warmerdam, P., Stricker, H. 2010. Fundamental hydrological research results drawn from studies in small catchment. *IAHS Publications* 336, 1: 47–53.
- Wheaton, J., Brasington, J., Darby, S., Sear, D. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 2: 136–156. doi:10.1002/esp.1886.
- WMO 2008. World Meteorological Organization guide to meteorological instruments and methods of observation. https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf, Geneva, Switzerland, part I, No. 8.
- Wren, D. G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., Derrow, R. W. 2000. Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering* 126, 2: 97–104. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:2(97).
- Yerima, B., van Ranst, E. 2005. *Introduction to Soil Science: Soils of the Tropics*. Oxford, Trafford Publishing: 440 str.
- Zeng, W., Beck, M. 2003. STAND, a dynamic model for sediment transport and water quality. *Journal of Hydrology* 277, 1-2: 125–133. doi:10.1016/S0022-1694(03)00073-8.
- Zorn, M. 2009. Erosion processes in Slovene Istria - part 1: Soil erosion. *Acta Geographica Slovenica-Geografski Zbornik* 49, 1: 39–68. doi:10.3986/ags49102.
- Zorn, M., Komac, B. 2005. Erozijski prsti na kmetijskih zemljiščih v Sloveniji. *Ujma* 19, 1: 233–238.

Ta stran je namenoma prazna

Priloga A

Priloga A: Članek 1

Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis

Bezák, N., Brilly, M., Šraj, M. (2014)

Hydrological Sciences Journal, 59(5): 959-977

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.831174>

Priloga B

Priloga B: Članek 2

Trivariate Frequency Analyses of Peak Discharge, Hydrograph Volume and Suspended Sediment Concentration Data Using Copulas

Bezak, N., Mikoš, M., Šraj, M. (2014)

Water Resources Management, 28(8): 2195-2212

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0606-2>

Priloga C

Priloga C: Članek 3

Flood frequency analyses, statistical trends and seasonality analyses of discharge data: a case study of the Litija station on the Sava River

Bezák, N., Brilly, M., Šraj, M. (2016)

Journal of Flood Risk Management, 1-15

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12118>

Priloga D

Priloga D: Članek 4

Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers

Bezák, N., Šraj, M., Mikoš, M. (2016)

Hydrological Sciences Journal, 1-15

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1006230>

Priloga E

Priloga E: Članek 5

Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River

Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. (2015)

Hydrological Processes, 29(2): 225-238

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10145>

Priloga F

Priloga F: Članek 6

Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure

Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. (2015)

Environmental Earth Sciences, 74(6): 5245.5261

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4534-0>

Priloga G

Priloga G: Članek 7

Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov

Bezák, N., Šraj, M., Mikoš, M. (2013)

Gradbeni vestnik, 62(12): 274-280

Članek je v izvorniku k doktorski disertaciji priložen zgolj v tiskani različici. V elektronski različici disertacije članek ni viden, zaradi spoštovanja določil z založnikom in je dostopen na spletnem naslovu:

<http://www.zveza-dgits.si/pregled-meritev-vsebnosti-suspendiranega-materiala-v-sloveniji-in-primer-analize-podatkov>

UDK: 519.2:556.3(497.4)

Priloga H

Priloga H: Članek 8

Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben

Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2013)

Acta hydrotechnica, 26(45): 85-97

UDK: 556.51:627.152.3(497.4)

UDK/UDC: 556.51:627.152.3(497.4)

Prejeto/Received: 22. 09. 2014

Kratki znanstveni prispevek – *Short scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 08. 01. 2015

**PRIMERJAVA DVEH SOSEDNIH EKSPERIMENTALNIH
HUDOURNIŠKIH POREČIJ: KUZLOVEC IN MAČKOV GRABEN**
**COMPARISON BETWEEN TWO ADJACENT EXPERIMENTAL
TORRENTIAL WATERSHEDS: KUZLOVEC AND MAČKOV GRABEN**

**Nejc Bezak^{1,*}, Mojca Šraj¹, Simon Rusjan¹, Mojca Kogoj¹, Andrej Vidmar¹, Matej Sečnik¹,
Mitja Brilly¹, Matjaž Mikoš¹**

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Izvleček

Ekperimentalna porečja, ki so pogosta tudi v svetovnem merilu, so pomemben dejavnik pri razvoju hidrologije, saj nam omogočajo opazovanje in proučevanje različnih procesov, kot so padavine, površinski odtok, premeščanje sedimentov, procesi erozije, itd. V prispevku so predstavljeni nekateri merski instrumenti, s katerimi smo opremili dve sosednji ekperimentalni porečji (Mačkov graben ter Kuzlovec) ter njuno okolico. Obe porečji sta del porečja reke Gradaščice, ki se izliva v Ljubljano, slednja pa je del porečja reke Save. V članku so prikazani nekateri preliminarni rezultati analiz izmerjenih podatkov s poudarkom na suspendiranih snoveh. Ugotovili smo, da do nastopa maksimalne vrednosti koncentracij suspendiranih snovi v povprečju pride pred nastopom konice pretoka, kar je pogosto značilnost manjših porečij, kjer so potencialni viri sedimentov locirani blizu struge oz. v strugi sami. Poleg tega je očitno, da imajo izraziti padavinski dogodki velik vpliv na premeščanje suspendiranih snovi. Meritve s časovnim korakom krajšim od ½ ure se bodo na obeh ekperimentalnih porečjih nadaljevale, s čimer bomo pridobili kvalitetne podatke, s katerimi bomo lahko nadgradili znanje o hidroloških procesih.

Ključne besede: ekperimentalna porečja, hudourniška območja, padavine, pretoki, suspendirane snovi, merski instrumenti.

Abstract

Experimental watersheds, which are frequent around the world, are important for improving our hydrological knowledge. Different hydrological processes such as precipitation, surface runoff, suspended sediment transport, erosion processes, are usually observed in the experimental watersheds. This paper presents some measuring equipment used in two experimental watersheds, namely Kuzlovec and Mačkov graben. Both catchments are part of the Gradaščica river basin, which drains into the Ljubljana river that is part of the Sava river basin. Some preliminary analysis results are also presented. One of the main conclusions was that the suspended sediment concentration peak occurs on average before the peak discharge, which is often the case for small watersheds. Here sediment sources are located near the channels or in the channel itself. Furthermore, significant precipitation events have a large influence on the suspended sediment

* Stik / *Correspondence:* nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

© Bezak N. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Bezak N. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

concentrations. Measurements with precise time step on both experimental watersheds will continue in the future. Measured data will be used as a basis for upgrading the knowledge about hydrological processes.

Keywords: experimental watersheds, torrent, precipitation, discharge, suspended sediments, measuring equipment.

1. Uvod

Eksperimentalna porečja (*ang.* experimental river basins), poimenovana tudi eksperimentalna povodja (*amer. ang.* experimental watersheds; *brit. ang.* experimental catchments) so temelj za razvoj hidrologije kot znanstvene vede s področja geofizikalnih ved in pridobitev novih spoznanj o procesih, ki so (ne)posredno povezani z vodo in kroženjem vode na Zemlji (vodnim krogom). Na eksperimentalnem porečju uporabljamo zanesljivo in robustno mersko opremo, ki omogoča zajem podatkov v različnih časovnih korakih in s katero lahko opazujemo npr. padavine, procese generiranja površinskega odtoka, kakovost vode, erozijske pojave, dinamiko podzemne vode, torej dinamiko naravnih procesov, lahko pa tudi vpliv človekovih posegov v naravno okolje, npr. v gozdove (Mikoš, 1994).

Porečje reke Reke je bilo prvo izmed večjih eksperimentalnih porečij na območju Slovenije, kjer so se meritve začele pred več kot 15 leti (Brilly et al., 2000; 2002; 2005; Šraj et al., 2008b). Kasneje je sta bili vzpostavljeni še eksperimentalni porečji Dragonje (Globevnik, 2001; Petkovšek, 2002; Petkovšek et al., 2003; Petkovšek in Mikoš, 2003; Šraj et al., 2008a; Petan, 2010) ter Gradaščice z Glinščico (Brilly et al., 2005; Rusjan et al., 2003). Brilly et al. (2005) je predstavil vsa tri eksperimentalna porečja in mersko opremo, ki je bila uporabljena. Z uporabo pridobljenih podatkov na eksperimentalnih porečjih so bile podrobno obdelane številne tematike, kot so npr. erozijski procesi (Petkovšek, 2002), prestrežene padavine (Šraj et al., 2008a), sproščanje nitratov (Rusjan et al., 2008), itd. Globevnik (2001) je prikazala karakteristike celostnega pristopa k upravljanju s porečji na primeru porečja Dragonje, ki ga je obravnaval tudi Petkovšek (2002), ki je opazoval in modeliral erozijske procese. Šraj (2003) je obravnavala proces prestrezanja padavin na istem porečju, ki je pomemben dejavnik v vodnem krogu, saj gre za hidrološko spremenljivko, ki

neposredno določa odtok s porečja. Rusjan (2008) je analiziral časovno dinamiko sproščanja hranil z gozdnatega prispevnega območja, kjer so bile terenske meritve izvedene v območju potoka Padež. Petan (2010) se je ukvarjal z meritvami in modeliranjem intenzitete padavin, določil pa je tudi karto erozivnosti padavin za Slovenijo.

Podobna eksperimentalna porečja so pogosta tudi v drugih državah (npr. Lenzi et al., 1999; Brocca et al., 2011; Coenders-Gerrits et al., 2013), kar pomeni, da je predstavljena tematika eksperimentalnih porečij aktualna. Seveda so terenske meritve predpogoj za nadgradnjo znanja o hidroloških procesih. V Evropi so se sicer prva eksperimentalna porečja pojavila že v začetku 20. stoletja (Warmerdam in Stricker, 2010).

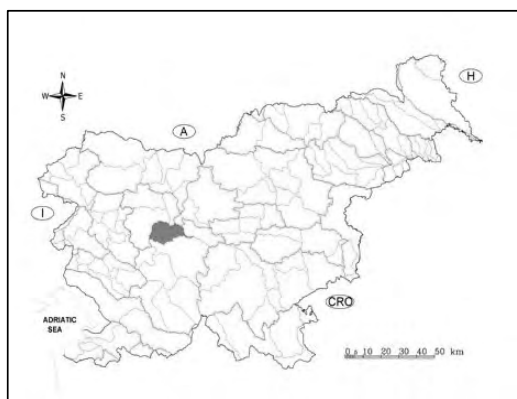
V nadaljevanju prispevka bosta najprej predstavljeni dve eksperimentalni hudourniški porečji, ki sta del vodnega telesa reke Gradaščice (Kuzlovec in Mačkov graben). Opisana bo uporabljena merska oprema ter rezultati preliminarnih analiz pridobljenih (izmerjenih) hidroloških podatkov.

2. Predstavitev eksperimentalnih porečij Mačkov graben in Kuzlovec

Izbrani eksperimentalni porečji Mačkov graben in Kuzlovec sta del porečja reke Gradaščice (sliki 1 in 2). Oba hudourniška potoka se iztekata v Veliko Božno (Božno), ki se pri Polhovem Gradcu združi z Malo vodo. Od sotočja naprej se reka imenuje Gradaščica. Slednja teče v osrednjem delu Slovenije, med dinarskim in alpskim svetom in se pri Bokalškem jezu v Ljubljani razdeli na Mestno Gradaščico ter Mali Graben. Mestna Gradaščica in Mali Graben se v Ljubljani izlivata v reko Ljubljaničico, ki je del porečja reke Save.

Porečje Gradaščice je večinoma hribovito, saj del območja sestavlja Polhograjsko hribovje z vrhovi tudi preko 1000 m (pomembnejši vrhovi so Tošč, Pasja ravan, Špik, Grmada, Gabrovec). To se

odraža v hudourniškem odzivu vodotokov (hiter nastop konice pretoka in tudi relativno hitro zmanjševanje pretokov), kjer so manj obsežne poplave relativno pogoste, lahko pa nastopijo tudi katastrofalne poplave, kot so bile npr. poplave leta 1924 ali 1926 (Jesenovec, 1994). Razgiban teren s strmimi pobočji in ozkimi dolinami je značilen tudi za izbrani eksperimentalni hudourniški območji (Mačkov graben ter Kuzlovec).



Slika 1: Lokacija porečja Gradaščice na karti Slovenije z označenimi hidro-geografskimi območji

Figure 1: Location of the Gradaščica watershed on the map of Slovenia with hydro-geographical areas

V preglednicah 1 in 2 so prikazane nekatere geološke, pedološke, topografske ter hidrografske značilnosti hudourniških območij Mačkov graben in Kuzlovec. Porečje Gradaščice obsega 158,8 km², izbrani eksperimentalni porečji pa predstavljata le majhen del celotnega porečja reke Gradaščice (preglednici 1 in 2). Hudourniško obnašanje obeh vodotokov je značilno za Mačkov graben in Kuzlovec (preglednici 1 in 2). Prevladujoča raba tal je v obeh primerih gozd, na obeh območjih je geološka sestava relativno podobna, prevladujoča prst pa je rendzina na apnencu in dolomitu (preglednici 1 in 2). Geološka podlaga je relativno erodibilna, kar pomeni, da lahko pri ekstremnih hidrometeoroloških pogojih

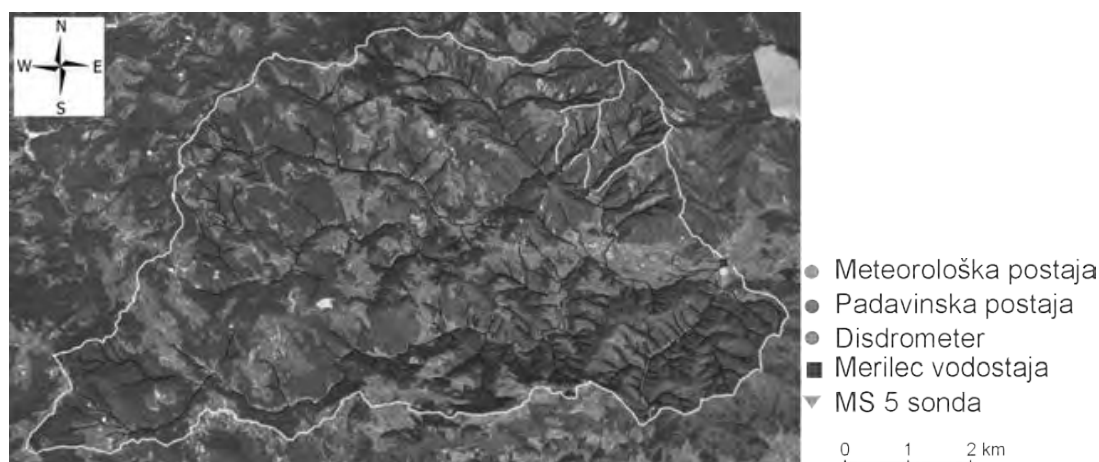
pričakujemo izrazite erozijske procese. Na hudourniškem območju Kuzlovca skoraj ni antropogenih vplivov, medtem ko so ti nekoliko izrazitejši na hudourniškem območju Mačkovega grabna.

Preglednica 1: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Mačkov graben

Table 1: Basic characteristics of the Mačkov graben experimental watershed

Prispevna površina	2,33 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	384 m; 1015 m; 649 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	58,5° (163,5%); 30,5° (59%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1780 m
Naklon struge (povprečje)	9,3 %
Pokrovnost in raba prostora (CLC)	Mešani gozd (40,4 %), listati gozd (28 %), pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije (11,6 %)
Geologija	Laporni apnenc, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenc; neplastovit dolomit; svetlo siv kristalast dolomit; Grödenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat
Pedologija	Rendzina na apnencu in dolomitu

Slika 3 prikazuje digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben ter struge vodotokov, slika 4 pa izbrano eksperimentalno območje na modelu terena (Google Zemlja, 2014). Slika 4 potrjuje, da je območje gozdnato in razgibano. Gozd namreč predstavlja skoraj 70% površine (preglednica 1).



Slika 2: Lokacija eksperimentalnih porečij Kuzlovec ter Mačkov graben na porečju Gradaščice

Figure 2: Location of the Kuzlovec and Mačkov graben torrents in Gradaščica River watershed

Preglednica 2: Osnovne lastnosti eksperimentalnega porečja Kuzlovec

Table 2: Basic characteristics of the Kuzlovec experimental watershed

Prispevna površina	0,71 km ²
Nadmorska višina (min, max, srednja)	394 m; 847 m; 631 m n.v.
Naklon porečja (max, povprečje)	46,5° (105,3%); 27,3° (51,6%)
Lega	SW
Letna količina padavin	1600-1800 mm
Dolžina glavne struge	1300 m
Naklon struge (povprečje)	22,2 %
Pokrovnost in raba prostora (CLC)	Mešani gozd (38,3 %), listati gozd (43,7 %), pretežno kmetijske površine z večjimi območji naravne vegetacije (18 %)
Geologija	Laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec; neplastovit dolomit; Grödenski skladi - rdeč peščenjak, alevrolit, prehodi v skrilavec in konglomerat; temno siv apnenec in dolomit
Pedologija	Rendzina na apnencu in dolomitu

Na sliki 5 je ena izmed zaplavniških hudourniških pregrad, ki so zgrajene v hudourniškem območju Mačkovega grabna kot eden izmed ukrepov za zmanjšanje poplavne ter erozijske ogroženosti. Zaplavna prostornina vseh omenjenih pregrad je izkoriščena, zaplavni prostor se ne prazni, kar pomeni, da za hudourniški pregradami ne prihaja do usedanja dotekajočih hudourniških plavin in tako te pregrade ne zmanjšujejo erozijske ogroženosti. Ker gre za območje, kjer so erozijski procesi izraziti, zapolnjenost pregrad verjetno ni posledica antropogenih vplivov.

DMV porečja Kuzlovec prikazuje slika 6, porečje pa je označeno še na modelu terena (Google Zemlja, 2014) na sliki 7. Podobno kot pri Mačkovem grabnu lahko tudi pri Kuzlovcu potrdimo ugotovitve o prevladujoči rabi tal, ki smo jih določili na podlagi karte pokrovnosti CLC Corine. Na Kuzlovcu gozd namreč predstavlja več kot 80 % celotne površine. Slika 8 prikazuje strugo hudournika Kuzlovec, kjer lahko opazimo, da se v bližini struge nahaja veliko kamninskega drobirja, zemeljskih usedlin ter zapadlega lesa, ki jih hudournik ob ekstremnih dogodkih premešča dolvodno v Veliko Božno. Tudi na porečju Kuzlovca sta postavljeni dve hudourniški pregradi. Tudi pri teh dveh pregradah je zaplavni prostor zapolnjen s hudourniški plavinami. Za oba hudournika je značilen stalni tok, kar pomeni da je voda v vodotoku prisotna v vseh štirih letnih časih.



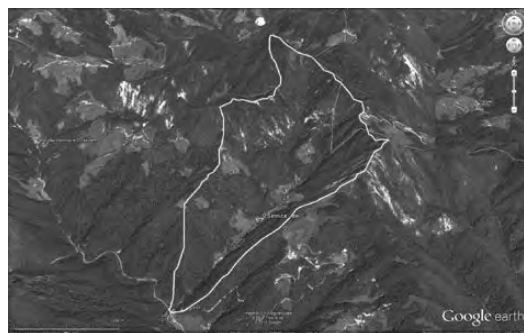
Slika 3: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Mačkov graben

Figure 3: Digital elevation model (DEM) of the Mačkov graben experimental watershed



Slika 6: Digitalni model višin (DMV) eksperimentalnega porečja Kuzlovec

Figure 6: Digital elevation model (DEM) of the Kuzlovec experimental watershed



Slika 4: Eksperimentalno območje hudournika Mačkov graben na modelu terena (Google Zemlja, 2014)

Figure 4: Mačkov graben experimental watershed (Google Earth, 2014)



Slika 7: Prispevno območje hudournika Kuzlovec na modelu terena (Google Zemlja, 2014)

Figure 7: Kuzlovec experimental watershed (Google Earth, 2014)



Slika 5: Hudourniška pregrada v strugi hudournika Mačkov graben

Figure 5: Check dam in the Mačkov graben torrent channel



Slika 8: Struga hudournika Kuzlovec

Figure 8: Kuzlovec torrent channel

3. Metodologija in predstavitev uporabljenih merilnih opreme

Za opazovanje hidroloških procesov je na porečju Gradaščice postavljena sodobna merska oprema. Lokacija posameznih merilnih instrumentov je prikazana na sliki 9. Uporabljena je naslednja merilna oprema:

- 6 avtomatičnih dežemerov (Onset RG2-M), ki so postavljeni v okolici Kuzlovca ter Mačkovega grabna;
- 2 tlačni sonde (Onset HOBO), ki sta locirani na iztoku iz Mačkovega grabna in Kuzlovca, ter služita merjenju vodostajev ter temperature vode in zraka;
- Sonda za meritve kakovosti vode (Hydrolab MS5), ki se ob ekstremnih dogodkih namesti na porečju Kuzlovca, in omogoča meritve pH, raztopljenega kisika, motnosti, nitratov, temperature ter številnih drugih parametrov;
- 2 disdrometra (Thies Clima ter OTT Parsivel) sta locirana nekaj kilometrov od obeh eksperimentalnih povodij (Ljubljana ter Črni Vrh nad Polhovim Gradcem) ter merita intenziteto padavin, velikost, porazdelitev in hitrost padavinskih delcev.

Za določitev pretočne krivulje se izvajajo tudi občasne meritve pretokov z uporabo merilnikov, ki pretok izmerijo na podlagi metode razredčenja (Flo-tracer) ter na podlagi Dopplerjevega efekta (FlowTracker). Večinoma gre za podobno opremo (uporabljene so nekatere novejšje različice merskih instrumentov), ki je bila uporabljena pri drugih eksperimentalnih porečjih (npr. Brilly et al., 2005; Rusjan, 2008; Rusjan et al., 2008; Šraj et al., 2008a; Petan et al., 2010). Primerjavo obeh merilnih instrumentov je naredila Cvetko (2013).

Dežmeri 1, 2, 3 in 4 so bili na terenu postavljeni poleti 2012, dežmera 5 ter 6 pa proti koncu leta 2012 (slika 9). Meritve vodostajev, temperature vode in zraka na iztoku iz Kuzlovca ter Mačkovega grabna so se začele poleti leta 2013 (slika 9). Meritve kakovosti vode s Hydrolab MS5 sondo so se prav tako začele poleti 2013 (slika 9), v istem obdobju je bil postavljen tudi disdrometer v Ljubljani na UL FGG, medtem ko disdrometer na

Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem meritve zagotavlja od poletja 2014. Občasne meritve pretokov za potrebe vzpostavitve pretočnih krivulj so potekale od poletja 2013 do spomladi 2014 ob različnih hidroloških pogojih (izvedenih je bilo več kot 10 meritev ob različnih vodostajih). Dežmeri 1, 2, 3, 4, 5 in 6 so postavljeni na nadmorskih višinah 630 m, 814 m, 774 m, 768 m, 661 m in 444 metrov. Disdrometer v Ljubljani se nahaja na nadmorski višini 292 metrov, disdrometer na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem pa na nadmorski višini 810 metrov.

Za meritve padavin se uporabljajo dežmeri Onset RG2-M, ki jih pogosto imenujemo tudi prekucniki (ang. *tipping bucket*). Za zagotovitev ustreznosti meritev je potrebno vsak dežemer umeriti. Slika 10 prikazuje dežemer med postavljanjem. Kapaciteta spominskega modula (ang. *data logger*) dežmera omogoča zapis 8000 dogodkov in ker vsak dogodek oz. prekuc mehanizma predstavlja 0,2 mm padavin (taka količina je določena s kalibracijo), to pomeni da lahko dežemer izmeri 1600 mm padavin (podatki se na spominski modul zapišejo ob padavinskem dogodku), potem pa je potrebno spominski modul sprostiti. Omenjeni dežmeri ne potrebujejo zunanega napajanja, spominski modul pa za zapis podatkov uporablja baterijo (CR2032).



Slika 10: Dežemer številka 6 med postavljanjem

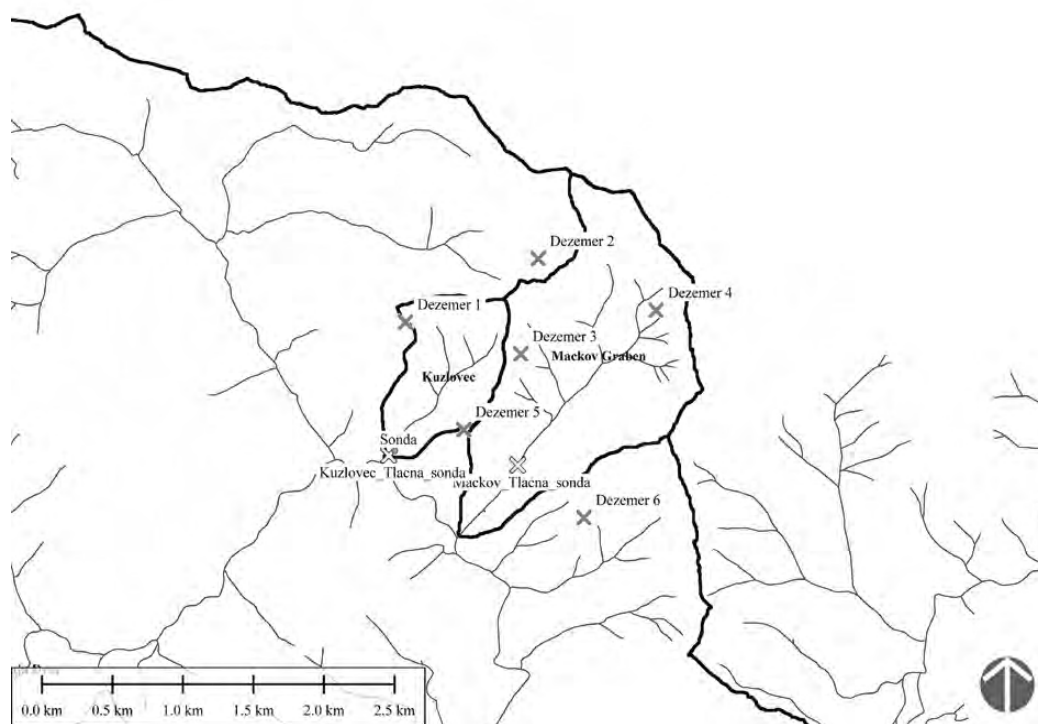
Figure 10: Rain gauge number 6 during installation process

Za meritve intenzitete padavin ter porazdelitve padavinskih delcev se uporabljata disdrometra, ki

sta locirana v Ljubljani (slika 11) ter Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem (slika 12). V Ljubljani je postavljen disdrometer proizvajalca OTT Parsivel, na Črnem Vrhu pa disdrometer proizvajalca Thies Clima. Podatki se zapisujejo na spominsko kartico (2 GB), izbran interval merjenja pa je 1 minuta. Oba instrumenta sta že bila uporabljena za opazovanje erozivnosti padavin na območju Slovenije (Petan et al., 2010). Petan (2010) pa je podal tudi nekoliko natančnejši opis prej omenjene merilne opreme ter metodologije merjenja. Osnovni princip delovanja obeh disdrometrov je drugačen kot pri običajnih dežemerih (prekucnikih), saj disdrometer določi količino, hitrost in porazdelitev padavinskih delcev na podlagi algoritma, ki upošteva spremembo napetosti, kot posledico prekinitve žarka (zaradi padavin) med sprejemno in odbojno glavo

disdrometra, zato se tudi izmerjene količine padavin razlikujejo od tistih, ki jih izmeri dežemer na sliki 13 (Petan, 2010). Na podlagi začetnih meritev lahko ocenimo, da so te razlike lahko tudi do 25 %.

Za meritve vodostajev ter temperature zraka in vode na iztoku iz Kuzlovca ter Mačkovega grabna se uporablja sonda proizvajalca Onset HOBO. Ena izmed sond meri vodni tlak (na sliki 13 je locirana v vodotoku), druga pa zračni tlak (barometrični; na sliki 13 je locirana na drevesu). Na podlagi teh podatkov je mogoče določiti vrednosti vodostajev. Zaradi tega sta v obeh porečjih postavljeni po dve sondi (ena v vodi ter ena v zraku). Izbrani interval merjenja je 10 minut, spominski modul pa omogoča zapis približno 20.000 (64 kB) dogodkov (meritev). Slika 13 prikazuje mikro-lokacijo obeh sond na eksperimentalnem porečju Kuzlovec.



Slika 9: Lokacija merilnih mest na porečju Gradaščice

Figure 9: Location of the measuring sites in the Gradaščica watershed



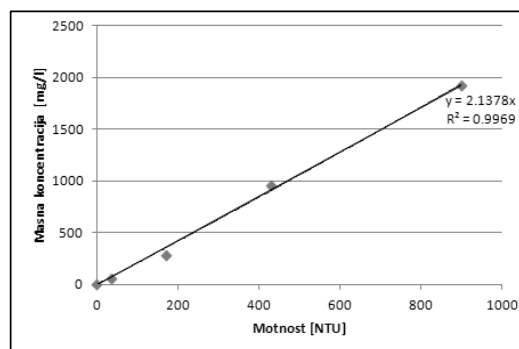
Slika 11: Disdrometer OTT Parsivel v Ljubljani
Figure 11: Disdrometer OTT Parsivel in Ljubljana



Slika 13: Lokacija vodne ter zračne sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovec
Figure 13: Location of the water and air data loggers in the Kuzlovec experimental watershed



Slika 12: Disdrometer Thies Clima in avtomatični dežemer na Črnem Vrh nad Polhovim Gradcem
Figure 12: Disdrometer Thies Clima and tipping bucket rain gauge in Črni Vrh nad Polhovim Gradcem



Slika 14: Zveza med masno koncentracijo suspendiranih snovi (mg/l) in motnostjo (NTU)
Figure 14: Relationship between mass concentration of suspended solids (mg/l) and turbidity (NTU)

Meritve motnosti se izvajajo s Hydrolab MS5 sondo, ki meri različne parametre, kot so motnost, pH, temperatura vode. Hydrolab MS5 sonda je prenosna naprava, ki za obratovanje ne potrebuje zunanjšega napajanja, saj se napaja z uporabo 8 običajnih AA baterij, čas delovanja brez potrebe po menjavi baterij pa je odvisen od časovnega koraka meritev ter števila izbranih parametrov, ki jih sonda meri. Za določitev koncentracije suspendiranih snovi na podlagi meritev motnosti je treba vzpostaviti zvezo med tema spremenljivkama (motnostjo in koncentracijo suspendiranih snovi), kot prikazuje slika 14. Za določitev povezave med motnostjo ter masno koncentracijo suspendiranih snovi smo na terenu vzeli 5 vzorcev. Za vsakega od petih vzorcev smo določili motnost z uporabo Hydrolab sonde. Za izračun masne koncentracije so bili vzorci filtrirani, sušeni, s tehtanjem pa smo določili maso delcev, ki so ostali na filtrirnem papirju. Slika 15 prikazuje mikro-lokacijo prenosne Hydrolab sonde. Izbrani časovni korak meritev je 20 minut.



Slika 15: Lokacija Hydrolab MS5 sonde na eksperimentalnem porečju Kuzlovca

Figure 15: Location of the Hydrolab MS5 sonde in the Kuzlovec torrent

4. Rezultati in razprava

Primer analize jesenskega dogodka (september leta 2013) je prikazan na sliki 16, kjer so prikazani podatki, ki so bili izmerjeni na porečju Kuzlovca. Padavinski podatki so prikazani s časovnim korakom 20 minut. Padavinski dogodek se je začel 9.9.2013 ob 5:20 ter trajal do 10.9.2013 ob 1:00, prikazani pa so podatki od nedelje 8.9.2013 ob 18:00 do torka 10.9.2013 ob 4:00. V tem obdobju je dežemer 1 izmeril 62.8 mm padavin, dežemer 3 66.6 mm padavin, dežemer 6 pa 71.2 mm. Povprečna intenziteta padavin je znašala približno 3.2-3.5 mm/h, medtem ko je bila maksimalna intenziteta padavin za dežemera 1 in 3 približno 15 mm/h (določena na podlagi 20 minutnih padavinskih podatkov). Opazimo lahko, da do nastopa konice koncentracije suspendiranih snovi pride pred nastopom konice pretoka. Pri drugi (večji) konici (slika 16) je razlika med nastopom konice pretoka ter konice koncentracije suspendiranih snovi 70 minut. Slika 17 prikazuje pozitivno histerezo med koncentracijami suspendiranih snovi ter pretokom (maksimalne vrednosti koncentracij suspendiranih snovi nastopijo pred konico pretoka). Taka dinamika obeh procesov je značilna predvsem za manjša porečja (npr. Soler et al., 2008), na kar kažejo tudi naše preliminarne ugotovitve, ki so prikazane na slikah 16 ter 17. Podobno obnašanje je značilno tudi za druge dogodke, izmerjene na porečju Kuzlovec, kjer je časovni zamik znašal med 20 minutami in 4 urami. Izmerili smo 11 dogodkov, ki so se zgodili v vseh štirih letnih časih v letih 2013 ter 2014. Potencialni viri sedimentov se v predstavljenem primeru nahajajo v bližini struge oziroma v strugi sami. Tako lahko pojasnimo tudi relativno ozke doline, ki so jih izoblikovali vodotoki na območju Polhograjskega hribovja. Negativno histerezo oz. pojav, ko do nastopa konice pretoka pride pred nastopom konice koncentracij suspendiranih snovi, lahko opazimo pri porečjih, kjer so glavni viri sedimentov oddaljeni od struge vodotoka (npr. Bača, 2008). Poleg tega smo na podlagi meritev različnih hidrometeoroloških parametrov ugotovili, da imajo meteorološki pojavi (ekstremne padavine) velikih intenzitet velik vpliv na fluvialno premešanje

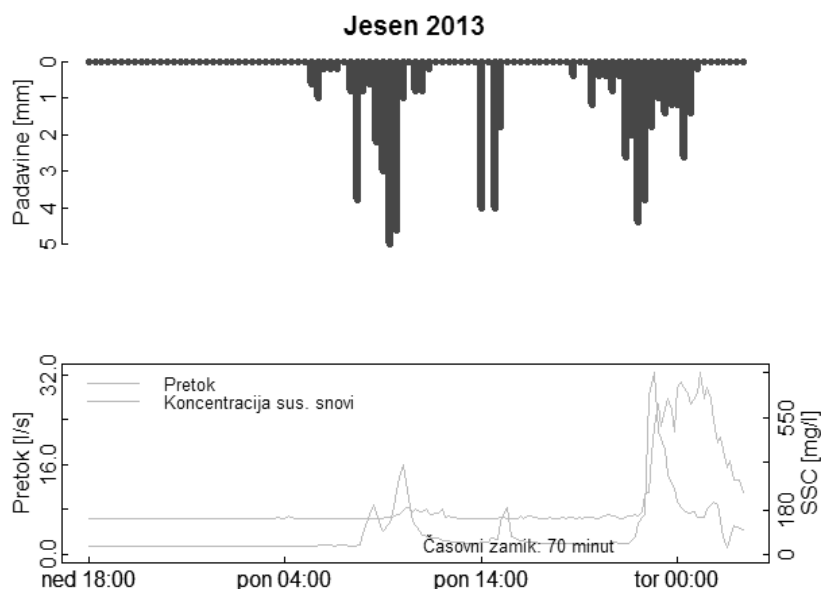
suspendiranih snovi (npr. Bača, 2008, Soler et al., 2008).

Izračunali smo tudi Pearsonov koeficient korelacije med vrednostmi padavin (dežemer številka 1), pretoki ter koncentracijami suspendiranih snovi prikazanimi na sliki 16 za prikazan dogodek, ki se je zgodil v septembru 2013 (približno 36 urno obdobje). Izračune korelacijskih koeficientov smo opravili tudi z zamikanjem podatkov, saj smo s tem opazovali, pri kakšnem zamiku je korelacija med omenjenimi spremenljivkami maksimalna. Ugotovili smo, da je odvisnost med padavinami in koncentracijami suspendiranih snovi izrazitejša kot odvisnost med pretokom in koncentracijami suspendiranih snovi. Največjo vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije med padavinami ter koncentracijami suspendiranih snovi smo dobili pri časovnem zamiku 60 minut (koeficient korelacije je znašal 0,78), odvisnost med pretoki in koncentracijami pa je bila maksimalna pri časovnem zamiku 70 min, kjer je Pearsonov koeficient korelacije znašal 0,71.

V približno 14 mesecih (od junija 2013 do avgusta 2014) smo izmerili 11 dogodkov (razporejenih v

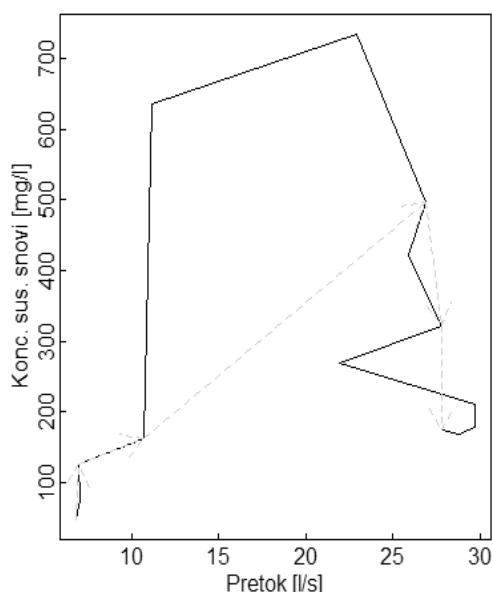
vseh štirih letnih časih), kjer smo pri vseh dogodkih z izjemo enega opazili, da do nastopa koncentracije suspendiranih snovi pride pred nastopom konice pretoka, časovni zamiki pa so znašali od 20 minut do 4 ure. Prav tako smo pri vseh dogodkih opazili, da so izmerjene vrednosti padavin dober indikator koncentracij suspendiranih snovi, v veliko primerih celo boljši kot vrednosti pretokov.

Slika 18 prikazuje primerjavo izmerjenih padavin med dežerami številka 1, 3 in 6 v obdobju med junijem ter oktobrom leta 2013. Prikazane so padavine v 20 minutnih časovnih intervalih. Dežer številka 3 je v tem obdobju izmeril 470 mm padavin, dežer 6 511 mm, dežer 1 pa 433.4 mm padavin. Razliko lahko pojasnimo z dejstvom, da gre za poletno obdobje, ko so pogoste lokalne poletne nevihte. Maksimalne 20 minutne padavine so bile v tem obdobju 12,8 mm in 16,2 mm za dežerama 3 in 6, medtem ko je pri dežer 1 maksimalna 20 minutna vsota padavin znašala 12.2 mm.



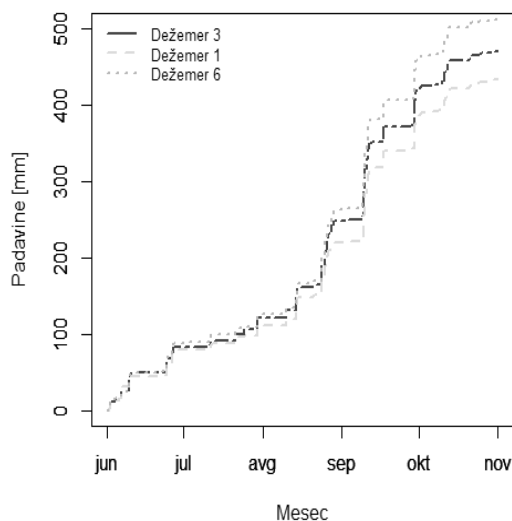
Slika 16: Primer analize hidrološkega dogodka, ki se je zgodil med 8.9.2013 ter 10.9.2013, na porečju Kuzlovca

Figure 16: Example of the hydrologic event, which occurred between 8.9.2013 and 10.9.2013, in the Kuzlovec torrent



Slika 17: Prikaz pozitivne histereze (svetlo modra črte) za hidrološki dogodek, ki se je zgodil jeseni leta 2013 na porečju Kuzlovca

Figure 17: Presentation of the positive hysteresis (light blue lines) effect for the autumn 2013 hydrologic event in the Kuzlovec torrent



Slika 18: Primerjava med dežemeri številka 1, 3 in 6 za obdobje od junija do oktobra leta 2013

Figure 18: Comparison between raingauges 1, 3 and 6 for the period between June and October 2013

5. Zaključki

V prispevku sta predstavljeni dve sosednji eksperimentalni hudourniški porečji v bližini Ljubljane in sicer hudourniško območje Mačkov graben in hudourniško območje Kuzlovec; obe sta del porečja reke Gradaščice, ki se izliva v Ljubljano in je del porečja reke Save. Opisane so nekatere osnovne topografske, geološke in hidrografske značilnosti obeh hudourniških območij, ki imajo velik vpliv na opazovane hidrološke procese, kot so padavine, generiranje površinskega odtoka ter premeščanje sedimentov.

Predstavljena je uporabljena merilna oprema ter nekatere značilnosti merilnih instrumentov. Nadalje so prikazani tudi nekateri preliminarni rezultati analiz pridobljenih hidroloških podatkov.

Na podlagi do sedaj pridobljenih podatkov lahko sklepamo, da konica sedimentograma v povprečju nastopi pred konico pretoka, kjer je časovni zamik znašal med 20 minutami ter 4 urami. Vrednosti časovnih zamikov so določene na podlagi do sedaj izmerjenih ter analiziranih dogodkov (11 dogodkov v vseh štirih letnih časih v obdobju od junija 2013 do avgusta 2014). Ta pojav je značilen za manjša porečja, kjer se potencialni viri sedimentov nahajajo relativno blizu struge oz. v strugi sami (Soler et al., 2008). Poleg tega je iz prikazanih rezultatov očitno, da imajo hidrometeorološki pojavi velikih intenzitet, kar so npr. ekstremni padavinski dogodki, nadpovprečen vpliv na fluvialno premeščanje suspendiranih snovi (npr. Bača, 2008, Soler et al., 2008).

Eksperimentalna porečja so ena izmed možnosti za pridobitev novih spoznanj, ki so povezana z opazovanim hidrološkim procesom. V prihodnje bomo meritve na eksperimentalnih hudourniških porečjih Mačkov graben in Kuzlovec nadaljevali z namenom, da zagotovimo daljše časovne serije hidroloških podatkov, kar bo omogočilo kakovostnejše hidrološke analize.

Zahvala

Terenske raziskave so potekale v okviru EU raziskovalnega projekta SedAlp, ki je financiran preko Alpine Space programa in iz raziskovalnega

programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Delo prvega avtorja je potekalo v okviru doktorskega izobraževanja in ga je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost. Za laboratorijsko analizo vzorcev vode se zahvaljujemo Renatu Babiču. Za recenzijo se zahvaljujemo dvema anonimnima recenzentoma.

Viri

- Bača, P. (2008). Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences Journal*, **53**(1): 224–235.
- Brilly, M., Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Kogovšek, J., Drobne, D. (2000). Eksperimentalno povodje reke Reke, Raziskave s področja geodezije in geofizike - 2000 : zbornik predavanj. *Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko*, 67–76 (in Slovenian).
- Brilly, M., Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Kogovšek, J., Drobne, D., Štravs, L. (2002). The Experimental monitoring of water regime in the Reka river = Eksperimentalna opazovanja vodnega režima na reki Reki. *Acta carsologica*, **31**(1), 65–74.
- Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S. (2005). Eksperimentalna porečja v Sloveniji, Raziskave s področja geodezije in geofizike - 2005 : zbornik predavanj. *Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko*, 47–59 (in Slovenian).
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Penna, D., Borga, M., Matgen, P., Heitz, S. (2011). Investigation of the hydrologic response of three experimental basins across Europe, *Die Bodenkultur*, **62**(1-4), 31–37.
- Coenders-Gerrits, A.M.J., Hopp, L., Savenije, H.H.G., Pfister, L. (2013). The effect of spatial throughfall patterns on soil moisture patterns at the hillslope scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 1749–1763.
- Cvetko, P. (2013). Stream flow measurements with two different instruments. Unpublished diploma thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 62 p. (in Slovenian).
- Globevnik, L. (2001). An integrated approach towards water management in catchments: an integrated analysis of time and spatial components of water regimes as the basis of modern procedures of modelling and planning of water management solutions, land use, and environmental protection: the Dragonja catchment. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 176 p. (in Slovenian)
- Google Zemlja (2014). Dostopno na: <https://www.google.com/earth/> (10.09.2014).
- Jesenovec, S. (1994). Poročanje časopisov o ujmi 8. Avgusta 1924. leta., *Mišičev vodarski dan 1994*, 34–37 (in Slovenian).
- Lenzi, M.A., D'Agostino, V., Billi, P. (1999). Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment, *Catena*, **36**(3), 171–190.
- Mikoš, M. (1994). Pomen eksperimentalnih povodij za ugotavljanje vplivov gozda na vodni režim. V: ANKO, Boštjan (ur.). Gozd in voda : zbornik seminarja, Poljče, 11. - 13. oktober 1994 = Forest and water : workshop proceedings, Poljče, October 11 - 13, 1994. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo, 51–60.
- Petan, S. (2010). Measurements and spatial modelling of rainfall erosivity of a soil erosion factor. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 205 p. Dostopno na: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/778> (10.09.2014) (in Slovenian).
- Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., Mikoš, M. (2010). The rainfall kinetic energy–intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia, *Journal of Hydrology*, **391**(3-4), 314–321.
- Petkovšek, G. (2002). Quantification and modelling soil erosion with an application on the Dragonja watershed. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 205 p. (in Slovenian)
- Petkovšek, G., Globevnik, L., Mikoš, M. (2003). Površinska erozija na eksperimentalnem povodju reke Dragonje - trendi v zadnjih 40 letih = Surface soil erosion in the experimental watershed of river Dragonja - trends in the past 40 years. *Gradbeni vestnik*, **52**(11), 276–281 (in Slovenian).
- Petkovšek, G., Mikoš, M. (2003). Meritve erozijskih procesov v eksperimentalnem povodju Dragonje, JZ Slovenija = Measurements of erosion processes in the experimental catchment of the Dragonja river, SW Slovenia. *Acta hydrotechnica*, **21**(34), 37–56.
- Rusjan, S., Fazarinc, R., Mikoš, M. (2003). River rehabilitation of urban watercourses on the example of the Glinščica river in Ljubljana. *Acta hydrotechnica*, **21**(34), 1–22.

- Rusjan, S. (2008). Hydrological controls of nutrient mobilization in watersheds. Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 206 p. Dostopno na: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/788> (10.09.2014) (in Slovenian).
- Rusjan, S., Brilly, M., Mikoš, M. (2008). Flushing of nitrate from a forested watershed : an insight into hydrological nitrate mobilization mechanisms through seasonal high-frequency stream nitrate dynamics, *Journal of Hydrology*, **354**(1-4), 187–202.
- Soler, M., Latron, J., Gallart, F. (2008). Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees), *Geomorphology*, **98**(1-2): 143–152.
- Šraj, M. (2003). Modeling and measuring of rainfall interception Doctoral thesis, University of Ljubljana, Faculty for Civil and Geoderic Engineering, 236 p. (in Slovenian)
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2008a). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia, *Agricultural and forest meteorology*, **148**(1), 121–134.
- Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M. (2008b). The experimental watersheds in Slovenia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **4**, 012051, 1–13.
- Warmerdam, P., Stricker, H. (2010). Fundamental hydrological research results drawn from studies in small catchment, *IAHS Publ.*, 336, 47–53.

Priloga I

Priloga I: Članek 9

Estimation of suspended sediment loads using copula function

Bezak, N., Rusjan, S., Kramar Fijavž, M., Mikoš, M., Šraj, M. (2016)

Oddano v recenzijo v SCI revijo