

PRILOG ANALIZI POPLAVNIH I VELIKIH VODA SLIVA RIJEKE SAVE DO ZAGREBA U RUJNU 2010. GODINE

dr. sc. Dušan Trninić

Državni hidrometeorološki zavod
Ravnice 48, Zagreb, Hrvatska
trninicmdusko@hotmail.com

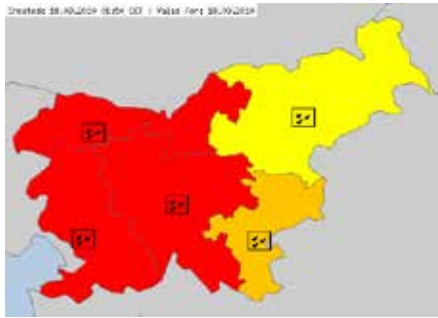
Tomislava Bošnjak, ing. građ.

Državni hidrometeorološki zavod
Ravnice 48, Zagreb, Hrvatska

Prvo prethodno upozorenje o mogućim obilnijim oborinama, Agencija Republike Slovenije za okolje, izdala je u četvrtak 16. 9. 2010. u 08:50. U njemu je pisalo: da se do kraja tjedna u Sloveniji očekuju obilne, jesenske oborine. Kako su se prognoze obistinile, bilo je potrebno, prema kriterijima Meteoalarma, razdoblje od 17. 9. do 19. 9. 2010. proglasiti najvišim (crvenim) stupnjem vremenske ugroženosti. U članku su detaljno navedene analize izuzetno obilnih oborina. Analize hidroloških prilika u Republici Sloveniji nastavljaju se Hidroalarmom u kojem su naznačena predviđanja stanja opasnosti od poplava. Svi značajni hidrološki podaci o velikim i poplavnim vodama: zabilježene maksimalne vrijednosti vodnog vala (datum i vrijeme pojave, vodostaj, protok) te povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka (za povratne periode $PP = 50, 100$ i 1000 godina), kao i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) na, za ovu analizu, odabranim hidrološkim postajama. Od prethodnog upozorenja: 16. 9. 2010. do pojave poplavnog vala na ulazu u Republiku Hrvatsku 19. 9. 2010. u 18:00, prošlo je samo 3 dana i 9 sati.

Ključni objekti Sustava obrane od poplava grada Zagreba svakako su lateralni kanal u desnom savskom nasipu kod Jankomira i rasteretni kanal Sava – Odra. Kod analiziranog poplavnog vala u rujnu 2010. izračunata je količina vode koja je išla preko preljeva Jankomir i kad se toj vrijednosti doda izmjereni protok kod Zagreba dobije se najveći, korigirani protok u analiziranom razdoblju od 95 godina. Međutim, zbog raznih utjecaja, preljev Jankomir više nezadovoljava projektiranim vrijednostima i treba ga redizajnirati. Režim nanosa, kao vrlo važna komponenta u svakom slivu i vodotoku, na analiziranom području sliva rijeke Save, zastupljen je samo s podacima o suspendiranom nanosu. Nažalost, vučeni nanos se nigdje ne mjeri.

Ključne riječi: poplava, velika voda, Sava, meteorologija, hidrologija, preljev, kanal



Slika 1: Proglašeni stupnjevi vremenske ugroženost (crveno – najviši stupanj) po kriterijima Meteoałarma za subotu, 18. 9. 2010. na teritoriji Republike Slovenije



Slika 2: Detalj poplavnih voda rijeke Krke (foto Janez Polajnar, snimljeno 19. 9. 2010.)

1. UVOD

Na početku treba reći da nema apsolutne obrane od poplavnih voda, ali se zato mogu i moraju poduzeti mjere koje će na minimum svesti štete od poplava, kako izravne tako i neizravne. Sustav ranog uzbunjivanja koji počiva na pravovremenim informacijama, meteorološkim i hidrološkim upozorenjima i prognozama u realnom vremenu, osnovica je za postizanje toga cilja.

U gornjem dijelu sliva Sava ima karakter bujičnog toka, i teče kroz usku kanjonsku riječnu dolinu. Kod Krškog ona ulazi u prostrane inundacione prostore s nasipima, djelomično izgrađenim ili uopće bez njih,

ili s namjerno ostavljenim neizgrađenim prostorima za ekspanziju voda u zaobalje. Posljednjih četrdesetak godina na rijeci Savi, a naročito na širem području grada Zagreba, događaju se značajne meteorološke, hidrološke, morfološke, psamološke, hidrogeološke i druge promjene. Ovdje treba naglasiti i na sve prisutnije i znanstveno verificirane klimatske varijabilnosti i klimatske promjene, te na sve izražajnije antropološke utjecaje na hidrološki režim. Sva meteorološka i hidrološka upozorenja, podaci, izvješća i analize vezani velike i poplavne vode iz Republike Slovenije, kako u realnom, tako i izvan realnog vremena, bili su dostupni (Internet i dr.) i značajno su korišteni u ovom članku.

Tablica 1: Dnevna (24 satna) količina oborine (mm), izmjerena u 8 sati ujutro u danima od 17. do 20. 9. 2010., na izabranim meteorološkim postajama. U šestoj koloni navedena je ukupna četverodnevna količina oborina (mm)

Meteorološka postaja	17. 9. [mm]	18. 9. [mm]	19. 9. [mm]	20. 9. [mm]	Ukupna količina [mm]
1	2	3	4	5	6
Otlica (nad Ajdovščino)	41	326	172	1	539
Topol pri Medvodah	60	158	101	0	320
Mrzla Rupa (nad Idrijo)	49	130	131	1	311
Hotedršica	28	143	136	0	307
Ajdovščina	23	163	108	0	294
Ljubljana Bežigrad	44	140	87	1	271
Postojna	6	95	132	1	235
Bovec	77	138	19	0	234
Dobrníč	16	102	99	16	233
Nova Gorica	72	61	93	0	225
Celje	36	118	65	1	220
Kredarica	51	125	41	1	218
Kočevje	16	110	82	1	209
Letališće Portorož	3	23	129	1	155
Novo Mesto	5	66	82	2	155
Letališće Cerklje ob Krki	5	59	73	3	139

Tablica 2: Dvodnevne količine oborina (mm), od 17. 9. do 19. 9. 2010. na nekim meteorološkim postajama.

Meteorološka postaja	Dvodnevna količina [mm]	Povratni period [god.]	Prijašnji rekord [mm]	Datum
1	2	3	4	5
Otlica (nad Ajdovščino)	498	>100	265	13. 6. 1982.
Hotedršica	279	>100	229	12. 12. 2008.
Ajdovščina	271	>100	265	28. 9. 1926.
Ljubljana Bežigrad	227	>100	200	28. 9. 1926.
Dobrníč	201	>100	116	27. 11. 2005.
Celje	183	>100	162	22. 9. 1933.
Zgornje Loke pri Blagovici	220	>100	186	28. 9. 1926.
Laško	186	>100	160	29. 9. 1933.
Topol pri Medvodah	259	100	326	28. 9. 1926.
Postojna	228	100	253	28. 9. 1926.
Kočevje	191	100	182	1. 8. 1941.
Novo Mesto	148	100	125	29. 9. 1989.
Škofja Loka	213	100	231	28. 9. 1926.
Godnje	252	100	384	28. 9. 1926.
Logatec	267	100	243	16. 8. 1963.
Zalošče	246	100	191	19. 10. 1961.
Letališće Portorož	152	25	147	23. 9. 1996.
Mrzla Rupa	261	5	357	7. 2. 1951.
Nova Gorica	153	5	319	7. 10. 1987.
Kredarica	166	5	240	14. 11. 1969.
Murska Sobota	72	5	138	15. 7. 1972.
Žiri	132	5	338	28. 9. 1926.

2. METEOROLOŠKE PRILIKE OD 16. DO 19. 9. 2010. NA PODRUČJU REPUBLIKE SLOVENIJE

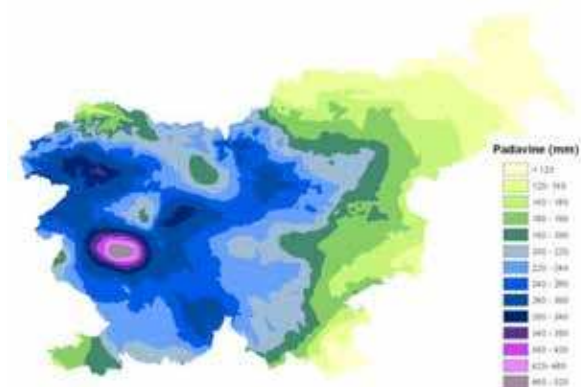
2.1. Izdana upozorenja o mogućim obilnim oborinama

Prvo prethodno upozorenje o mogućim, obilnim oborinama: ARSO, Državna meteorološka služba RS (2010a) izdala je, u četvrtak 16. 9. 2010. u 08:50. U njemu je pisalo: u Sloveniji se do kraja tjedna očekuju obilne jesenske oborine. Predviđa se da će oborine biti najobilnije od 18. do 19. 9. 2010. U Posočju bi u približno 48 sati, predvidivo palo od 250 do 350 l/m². Velike količine oborina treba očekivati i drugdje – u zapadnoj, južnoj i srednjoj Sloveniji od 80 do 150 l/m², te u zapadnoj od 40 do 70 l/m². Najveći intenziteti oborina očekuju se u noći od petka na subotu i ponovo u noći sa subote na nedjelju. Ukoliko se upozorenje ne bude mijenjalo, onda će se za navedeni događaj za zapadnu Sloveniju proglasiti crveni (najviši) stupanj vremenske ugroženosti. U tom trenutku očekuje se značajan porast vodostaja

rijeka, posebno u Posočju, na području Vipavske doline, na području Bohinja te na širem obalnom području, kao i na području Notranjske. Moguće je i razlivanje voda iz vodotoka. Kako su nadolazeći numerički rezultati atmosferskog prognostičkog modela Europskog centra za srednjoročne vremenske prognoze (ECMWF) još više zaoštrili opasnost od vremenske situacije, i zato je, prema kriterijima Meteolarma, razdoblje od petka 17. do nedjelje 19. 9. 2010. proglašeno najvišim (crvenim) stupnjem vremenske ugroženosti. Nastavno na to, u petak 17. 9. 2010. u 11:00 održana je posebna tiskovna konferencija, na kojoj su mediji upozoreni na očekivane teškoće u narednim danima. Na [slici 1](#) navedeni su proglašeni stupnjevi vremenske ugroženosti po kriterijima Meteolarma za 18. 9. 2010. (izdan 18. 9. 2010. u 01:54), na teritoriji Republike Slovenije.

2.2. Izuzetno obilne oborine od 16. do 19. 9. 2010.

Detaljan opis sinoptičke situacije koja je generirala obilne oborine na teritoriju Republike Slovenije i naveden je u članku ARSO (2010.a). U Sloveniji su od



Slika 3 Karta sume 4-dnevnih količina oborina (mm) od 8. sati 16. 9. do 8. sati 20. 9. 2010. na teritoriji Republike Slovenije

petka 16. 9. do nedjelje 19. 9. 2010. zabilježene velike količine oborina koje su uzrokovale pojavu velikih i poplavnih voda na većini slovenskih rijeka, a posebno su bile izražene poplavne vode na Vipavi, Idrijci, Poljanskoj Sori, Savinji u donjem toku, Krki i Savi u donjem toku, kao i na kraškim poljima Notranjskog i Dolenjskog krša te Ljubljanske bare. Poplavljene su bile velike površine urbanih područja u većem dijelu države. Na slici 2 prikazane su poplavne vode rijeke Krke.

Najviše oborina palo je na području između Ajdovščine i Idrije, preko 500 mm (tablica 1). U mnogim mjestima

u srednjoj i zapadnoj Sloveniji ukupna količina oborina prelazila je 200 mm, dok je na brojnim postajama većina oborina pala u 24-satnom razdoblju. Na Primorju su se pojavile manje količine oborina (tablica 2).

Na slici 3 prikazana je karta 24-satnih količina oborina od 8 sati 16. 9. do 8 sati 20. 9. 2010.

Na području Republike Slovenije, iz kojih je vidljivo gdje je centar oborina kao i područja gdje je pala najveća količina oborina. U tablici 2 navedene su dvodnevne količine oborina (mm), od 17. do 19. 9. 2010. na nekim meteorološkim postajama. U koloni 3 navedeni su povratni periodi u godinama za rekord do kolovoza 2010. (za neke postaje su uzeti u obzir i podaci obližnjih postaja u prošlosti). Nove rekordne vrijednosti dvodnevni količina oborina označene su podebljano crvenom bojom (druga kolona).

U koloni 6 podebljano i crvenom bojom prikazane su nove, rekordne vrijednosti količina oborina (mm) pale u rujnu 2010.

3. HIDROLOŠKE PRILIKE OD 17. DO 21. RUJNA 2010. NA PODRUČJU REPUBLIKE SLOVENIJE

Kao što je navedeno u meteorološkim karakteristikama za razdoblje od 16. do 19. 9. 2010. važno je izdvojiti

Tablica 3: Usporedba najvećih četverodnevni količina oborina (mm) na nekim meteorološkim postajama, s proteklim iznimnim oborinskim i poplavnim događajima u rujnu 1926., rujnu 1933., listopadu/studenom 1990., u rujnu 2007. i u rujnu 2010.

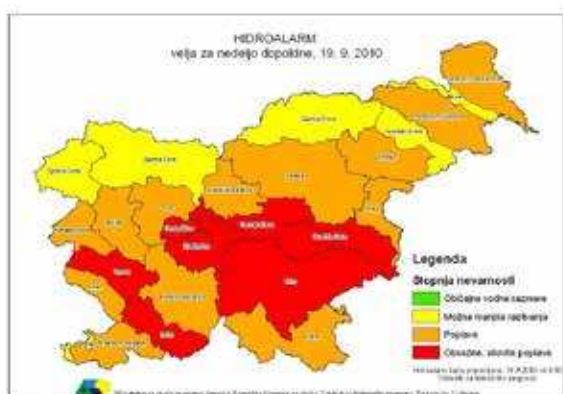
Meteorološka postaja	rujan 1926.	rujan 1933.	listopad/studen 1990.	rujan 2007.	rujan 2010.
1	2	3	4	5	6
Ajdovščina/Vipava	282	102	151	54	294
Celje	157	221	123	194	220
Godnje	418	216	105	70	258
Hotedršica			216	57	307
Kočevje			129	48	209
Kredarica			256	199	218
Laško	172	216	135	74	214
Lesce/Bled	134	194	150	184	201
Letališče Portorož/Sečovlje	107	64	30	77	155
Ljubljana Bežigrad	255	259	126	81	271
Nova Gorica			208	43	225
Novo Mesto			92	43	155
Otlica			246	60	539
Postojna	305	321	113	90	235
Škofja Loka	274	207	196	226	242
Šmartno pri Slovenj Gradcu/Slovenj Gradec	127	203	143	88	141
Topol pri Medvodah/Sv.Katarina	379		146	122	320
Zgornje Loke/Blagovica	221	231	135	126	268
Žiri	373	185	218	64	178

Tablica 4: Izbor najvećih poplavnih događaja za Laško na Savinji (razdoblje: 1907. - 2010.)

Laško na Savinji	Vrh vodnog vala m^3s^{-1}	Maksimalni prosječni 4-dnevni protok	Volumen vala $10^6 m^3$
rujan 1933	1202	627	54.173
studen 1990	1406	547	47.261
studen 1923	694	503	43.481
rujan 2010	1030	498	43.048
listopad 1964	1096	491	42.422
rujan 1973	1030	431	37.217
studen 1998	1095	430	37.195

najvažnije događaje koji su generirali velike i poplavne vode, koje su u pojedinim krajevima bile najizraženije od kada postoje mjerenja. U tom razdoblju većina rijeka je počela plaviti, najviše Savinja, Krka i Sava u donjem toku. Poplavljene su velike površine urbanih područja u većem dijelu države. Agencija RS za okolje (ARSO) i njene službe: meteorološka, hidrološka i služba za hidrometrijska mjerenja bile su spremne za djelovanje. Prvo, prethodno upozorenje o mogućim, obilnim oborinama: ARSO, Državna meteorološka služba (2010a) izdala je, **u četvrtak 16. 9. 2010. u 08.50 sati**. U njemu je pisalo: u Sloveniji se do kraja tjedna očekuju obilne jesenske oborine. To je bila i prva, upozoravajuća, informacija i za sve službe u Hrvatskoj koje sudjeluju u zaštiti od štetnog djelovanja voda. Kako su nadolazeći rezultati numeričkih atmosferskih prognostičkih modela Europskog centra za srednjoročne vremenske prognoze (ECMWF) još više naglasili opasnost od vremenske situacije, bilo je nužno, prema kriterijima Meteoalarma, razdoblje od petka 17. 9. do nedjelje 19. 9. 2010. proglasiti najvišim (crvenim) stupnjem vremenske ugroženosti. Grafički prikaz sadržaja Meteoalarma za 18. 9. 2010. prikazan je na [slici 1](#).

Sve detaljne karakteristike obilnih oborina od 16. do 19. 9. 2010., koje su generirale pojave velikih i poplavnih voda u Sloveniji, i koje su u narednim danima došle u Hrvatsku, prikazane su u [tablici 1](#), na [slici 3](#), te u



Slika 4: Predviđanja stanja opasnosti od poplava sa standardnim Hidroalarm prikazom za nedjelju prije podne 19. 9. 2010.

[tablicama 2 i 3](#).

3.1. Izdana upozorenja Hidroalarma

Na [slici 4](#) naznačena su predviđanja stanja opasnosti od poplava sa standardnim Hidroalarm prikazom za nedjelju prije podne 19. 9. 2010.: (Strojan i dr. 2010.)

3.2. Analiza volumena poplavnih valova

Vrh vodnog vala nije jedino mjerilo karakteristike velike i poplavne vode i zato je izrađena analiza o volumenima velikih i poplavnih voda za postaje, za koje se raspolagalo dugim nizom podataka: (Strojan i. dr. 2010.). Naprimjer, za Laško na Savinji se pokazalo da je poplava od 17 do 20. 9. 2010. četvrta najveća poplava od 1907. Veće su bile poplave između 22. i 24. 9. 1933. i studenog 1990. i na kraju prosinca 1923. U [tablici 4](#). je prikazan izbor najvećih poplavnih događaja, prema veličini volumena vala za Laško na Savinji.

Prema ovom kriteriju, katastrofalna poplava na Savi kod Zagreba, a prema podacima za Laško na Savinji, na petom je mjestu. Izbor najvećih poplavnih događaja za Šentjakob na Savi, prema kriteriju maksimalni poprečni 3-dnevni protok ($m^3 s^{-1}$) u razdoblju 1926. - 2010. vrlo je interesantan. Na prva dva mjesta su poplavni događaji iz studenog 1926. i rujna 1933. Analizirana poplava iz rujna 2010. nalazi se na jedanaestom mjestu, a među prvih deset nema katastrofalne poplave Save kod Zagreba u listopadu 1964.

3.3. Vodomjerenja od 17. do 21. 9. 2010. na teritoriji Republike Slovenije

Dvije hidrometrijske ekipe su za vrijeme rujanskih velikih i poplavnih voda izvele 35 vodomjerenja na 28 hidroloških postaja. U [tablici 5](#) prikazan je pregled zabilježenih podataka (datum i vrijeme pojave vrha vodnog vala - H i Q), povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka - PP u godinama i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) za najvažnije hidrološke postaje u analiziranom dijelu sliva Save. Kod tih mjerenja bila su upotrebljena dva akustična doplerova mjerača protoka ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) koji rade s frekvencijama 1200 kHz i 600 kHz. Mjerač koji radi na frekvenciji od

Tablica 5: Pregled zabilježenih maksimalnih vrijednosti vodnog vala (datum i vrijeme pojave vrha vodnog vala - H i Q), povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka - PP u godinama i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) na, za ovu analizu, odabranim hidrološkim postajama u Republici Sloveniji

VODOTOK	POSTAJA	ZABILJEŽENO			POVRATNI PERIOD PP [god]			MJERENO		
		Datum	H [cm]	Q [m ³ s ⁻¹]	50	100	1000	Datum	H [cm]	Q [m ³ s ⁻¹]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
LJUBLJANICA	Moste	19.9. 10:15	307	351	384	403	464	21.9. 14:00	277	282
SAVA	Šentjakob	19.9. 06:30	804	1237	1521	1636	1995	18.9. 16:30	768	1160
GRADAŠČICA	Dvor	18.9. 03:00	313	67.5	70,2	74,7	88,1	17.9. 17:00	297	59.3
SAVA	Hrastnik	19.9. 14:30	1092	2159	2338	2542	3214	19.9. 14:00	1092	2160
	Vrhovo *	-	-	-	-	-	-	19.9. 12:30	-	3184
SAVINJA	V. Širje	18.9. 10:00	833	1092	1474	1694	2547	19.9. 11:30	813	1024
KRKA	Podbočje	20.9. 02:30	457	463	422	434	460	20.9. 07:00	456	468
SAVA	Čatež	19.9. 17:50	897	3727	3600	4000	5130	19.9. 11:00	855	3384
	Jesenice/D **	19.9. 18:00	815	(3700) **	-	-	-	-	-	-

* Vodomjerenje je izvedeno na mostu preko Save približno 400 m iznad HE Vrhovo radi kontrole ukupnih protoka Save i Savinje

** Procjena protoka je izrađena na podlozi izvedenih vodomjerenja u danima između 17. i 20. 9. 2010.: (Strojan i dr. 2010.).

Kod svih ekstremnih hidroloških situacija nastoji se, što je više moguće, izmjeriti što više protoka kod velikih i naročito poplavnih voda. Zbog objektivnih i subjektivnih razloga to nije uvijek moguće.

600 KHz namijenjen kod mjerenja protoka kod velikih voda kod kojih su uvjeti mjerenja posebno otežani. Iz podataka **tablice 4** vidi se da su na nekim profilima izmjereni najviši protoci kao što su: Sava kod Šentjakoba zabilježen protok vrha vodnog vala od 1237 m³s⁻¹, a izmjeren 1160 m³s⁻¹, Sava kod Hrastnika zabilježen od 2159 m³s⁻¹, a izmjeren 2160 m³s⁻¹, na Savi kod Čateža zabilježen protok od 3727 m³s⁻¹, a izmjeren 3384 m³s⁻¹. Na Savinji kod V. Širja zabilježen je protok od 1092 m³s⁻¹,

a izmjeren 1024 m³s⁻¹. Na Krki kod Podbočja zabilježen je protok od 463 m³s⁻¹, a izmjeren protok 468 m³s⁻¹ što odgovara protoku povratnog perioda PP > 100 godina.

Na primjer, pored mjerenja na vodomjernim profilima Agencije RS za okolje (ARSO), njeni djelatnici pokušali su izvesti, tražena mjerenja protoka Save na području Nuklearne elektrane Krško (NEK). Mjerenja su se pokušala izvesti na trima mostovima uzvodno od NEK-a, ali se zbog suženog poprečnog profila koji



Slika 5: Poplavne vode u blizini NE Krško u rujnu 2010. (https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_elektrana_Krško)



Slika 6: Suženi poprečni profil na Savi uzvodno od NE Krško (foto: Marko Burger, snimljeno 19. rujna 2010.)



Slika 7: Detalj poplavne površine rijeke Save u Republici Sloveniji, prije granice s Hrvatskom (foto Najc Pogačnik, snimljeno 19. 9. 2010.)

uzrokuje prebrz i previše valovit tok, nije bilo moguće naći odgovarajuće mjerno mjesto koje bi omogućilo pouzdanu, i prvenstveno sigurnu izvedbu mjerenja protoka vodotoka (slika 5 i 6), pa nisu izvedena tražena vodomjerenja.

I mjerenja protoka za vrijeme ovih poplavnih i velikih voda, pokazala su da je za izvođenja samih mjerenja izuzetno važno imati uređen mjerni profil. Pristup obalama i slabo održavanje mjernog profila, uz dodatne teškoće uzrokovane plivajućim stablima i granjem, snažno otežavaju provedbu mjerenja protoka, a može biti opasno za ljude koji mjere, kao i za mjernu opremu. Samo neke hidrološke postaje: Šentjakob i Hrastnik na Savi i Veliko Širje na Savinji opremljene su žičanim premošćenjem (žičarom) koje su se i kod ove poplave pokazale vrlo pogodnim za mjerenja protoka jer je manje vrtložnja i rezultati mjerenja su bolji. Mjerenja s mostova su manje točna jer se tok vode dodatno vrtloži oko upornjaka mosta. Na hidrološkoj postaji Hrastnik postoji ručna žičara. Hidrološke postaje Šentjakob na Savi i Veliko Širje na Savinji opremljene su elektronskim žičarama koje imaju mogućnost brze reakcije u slučaju prijetnji plutajućih stabala i granja, gdje je brzina reakcije presudna za sigurnost mjerne opreme.

Na slici 7 vidi se detalj rijeke Save i poplavne površine u Republici Sloveniji, prije granice s Republikom Hrvatskom, 19. 9. 2010. oko 18:00.

4. ULAZ POPLAVNOG VALA RIJEKE SAVE U REPUBLIKU HRVATSKU

Prvo prethodno upozorenje o mogućim, obilnim oborinama ARSO, Državna meteorološka služba (2010a) izdala je, u četvrtak 16. 9. 2010. u 08:50. U njemu je pisalo: u Sloveniji se do kraja tjedna očekuju obilne jesenske

oborine. Predviđa se da će oborine biti najobilnije od petka 17. ujutro do nedjelje 19. 9. 2010., sredinom dana. Od toga prethodnog upozorenja, do pojave poplavnog vala na granici Slovenije i Hrvatske, prošlo je samo 3 dana i 9 sati. Iz tih podataka se vidi važnost informacija, podataka, i upozorenja Meteo i Hidroalarma iz Republike Slovenije u organizaciji praćenja poplavnog i velikog vodnog vala u Republici Hrvatskoj.

Na slici 7 se vidi, detalj poplavnog vala koji je 19. 9. 2010. oko 18 sati ušao u Republiku Hrvatsku.

Na granici se nalazi jedinstveni hidrološki profil Jesenice na Dolenjskom (desna obala rijeke Save - RS) i hidrološki profil Drenje Brdovečko (lijeva obala rijeke Save - RH). Prema podacima iz Slovenije: ARSO (2010b), maksimalni vodostaj $H = 815$ cm, zabilježen je 19. 9. 2010. u 18:00 na hidrološkoj postaji Jesenice na Dolenjskom. Tom vodostaju pridružen je procijenjeni protok od $3700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Procjena protoka je izvedena na podlozi vodomjerenja u danima između 17. i 20. 9. 2010. Na postaji Drenje Brdovečko zabilježen je maksimalni vodostaj $H = 580$ cm, 19. 9. 2010. Prema krivulji protoka, tom vodostaju odgovara protok od $3792 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, koji je ekstrapolirana vrijednost s krivulje protoka na kojoj je najveći izmjereni protok bio samo $1404 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Na slici 8 je prikazan jedinstveni poprečni profil Save:



Slika 8: Poprečni profil Save kod Jesenica/D (glavno korito na desnoj obali - RS) i Drenja Brdovečkog (inundacija, široka više od 900 m, na lijevoj obali - RH)

kod Jesenica/D (glavno korito na desnoj obali – RS) i Drenja Brdovečkog (inundacija, široka više od 900 m, na lijevoj obali - RH), iz kojeg se vidi da se radi o vrlo kompliciranom profilu, na kojem je vrlo teško izmjeriti pravi, odgovarajući protok.

Na profilu hidrološke postaje Drenje Brdovečko izvode se vodomjerenja od 2004. Da bi ta vodomjerenja bila što kvalitetnija, naprimjer, 15. 5. 2015. izvedena su simultana mjerenja protoka (ADCP-om i RiverRay-om) s ekipama iz Slovenije i Austrije. U nastojanju daljnjeg poboljšanja mjerenja protoka na ovom, izuzetnom zahtjevnom profilu, postavljen je SIMK uređaj i metoda u kojoj se radi o numeričkom, a ne fizičkom modeliranju fizikalnih procesa. U uvjetima visokih i poplavnih voda, rijeke se razlijevaju u inundacijska područja, kakva je situacija i na profilu Save kod Drenja Borovečkog (slika 8) kod aktualne analize poplavnih i velikih voda iz rujna 2010. U tom slučaju, kada se mjerenjem s ADCP uređajem susrećemo s odgovarajućim, praktičnim ograničenjima koja otežavaju samu realizaciju mjerenja, najbolje je odrediti protok primjenom metode referentne brzine: (Terek, 2007.). Radi se o novijoj metodi, čiji se rezultati tek trebaju dokazati u praksi.

Glavna karakteristika obrane od poplava na rijeci Savi uzvodno od Zagreba je nedovršenost (neizgrađenost) obrambenih nasipa uzvodno od Podsusedskog mosta (područje Zaprešića i Samobora), prvenstveno uvjetovano izgradnjom HE Zaprešić i formiranjem pripadnog bazena. Do sada nezabilježeni visoki vodostaji i veliki protoci prouzročili su poplavljanje nezaštićenih područja, ali i oštećenja nasipa na dionicama gdje su oni nedovoljne visine ili slabe kvalitete zbog starosti ili loše izvedbe pa je došlo do podvira, klizišta, ali i prodora nasipa (18. 9. 2010.), dok je u noći 18. na 19. započelo zatvaranje vrećama denivelacija nasipa na desnoj obali. Velike vode Sutle i Krapine izlile su se na nižim područjima.

Samo 15-ak km od granice, poplavni val dolazi do hidrološke postaje: Podsused – žičara koja je osnovana, davne 1885. Na toj postaji mjere se vodostaj, protok i suspendirani nanos. Nažalost, prekinuta su mjerenja temperature vode i vučenog nanosa. Na tom profilu, u razdoblju: 1949. - 2019. (N = 71 godina) zabilježen je 20. 9. 2010. u 03:00 maksimalni protok od $3360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a izmjeren protok bio je $3117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što ga pozicionira na drugo mjesto najvećih izmjerenih protoka na analiziranom području u Hrvatskoj. Na prvom mjestu, na Savi kod Zagreba, izmjeren je maksimalni protok od $3122 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok je vrh toga vala iznosio $3126 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a radi se o katastrofalnoj poplavi Save kod Zagreba 26. 10. 1964.: (Trninić 2014.). Korito Save je na tom potezu regulirano, izgrađeni su nasipi za obranu od poplave te je nizvodno od mosta Jankomir izgrađen preljev za evakuaciju velikih i poplavnih voda koje idu u rasteretni kanal Sava – Odra kojim se grad Zagreb štiti od poplava. Ključni objekti sustava obrane od poplava grada Zagreba svakako je lateralni preljev u desnom savskom nasipu kod Jankomira i rasteretni kanal Sava-Odra. Ovaj, relativno jednostavan objekt, po efikasnosti

nema konkurencije u cijelom sustavu Srednje Posavlje. Prednost mu je u automatskom aktiviranju i velikoj moći kapacitiranja. Kod planiranja izgradnje sustava obrane od poplava rijeke Save, zahvat je imao oznaku prioriteta prvog reda. Redukcija maksimalnih protoka u Zagrebu njegov je prvenstveni zadatak, ali se pozitivne mjere njegovog djelovanja pružaju i na nizvodnom toku rijeke Save. Preljev je izgrađen krajem sedamdesetih godina. Iako je sam preljev više puta bio u funkciji, rasterećena voda nije uvijek upuššana u kanal Sava – Odra. Razlog neaktiviranja je poprečni nasip u kanalu, koji je izgrađen kao privremeni objekt, kako bi se u raznim fazama gradnje kanala spriječilo punjenje kada ono nije krajnje nužno. Poprečni nasip, zbog teškoća u prometu koje nastaju pri aktiviranju kanala, još egzistira, ali su sve češće dileme o opravdanosti njegovog daljnjeg opstanka.

Kanal je velike i poplavne vode Save prihvaćao do sada sedam puta: dva puta 1979., 1980., 1990., 1998., 2010. i 2012. Obrane od velikih i poplavnih voda na rijeci Savi u svrhu zaštite grada Zagreba sastoji se od obostranih zaštitnih nasipa kojim se štiti glavno korito, te od preljeva Jankomir i rasteretnog kanala Sava - Odra, uzvodno od Zagreba. Nasipi su udaljeni od obala reguliranog korita na udaljenosti od cca 100 m, prosječne visine oko 4,0 m, širine krune 5,0 m i nagiba pokosa 1:2. Tako izvedeno korito Save kroz Zagreb ima mogućnost primitka reducirane 100 godišnje protoke od $2650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ uz nadvišenje od 1,5 m do krune nasipa, odnosno 1000 godišnje reducirane protoke od $3270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s nadvišenjem od 1,0 m do krune nasipa. Na ovaj način realizira se zahtjev da područje grada od Mićevačkog do Podsusedskog mosta ima obranu od 1000 godišnjih velikih i poplavnih voda, uz napomenu da nema apsolutne obrane od poplava i da uvijek postoje ekstremi ekstrema. Važno je spomenuti da je na Savi kod Podsuseda/ž 19. 9. 2010. kod vodostaja $H = 526 \text{ cm}$ izmjeren izuzetno veliki protok od $3117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, koji je po veličini na drugom mjestu u Hrvatskoj, odmah iza protoka na Savi kod Zagreba od $3122 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($H = 511 \text{ cm}$) koji je izmjeren 26. 10. 1964. za vrijeme katastrofalne poplave grada Zagreba koja je bila prije 60 godina, a Trninić (2014.) je detaljno analizirao sve najvažnije karakteristike prethodnog, kao i samog poplavnog vala na Savi kod Zagreba u listopadu 1964. I danas se vidi izuzetan značaj i doprinos djelatnika Državnog hidrometeorološkog zavoda, koji su hidrometrijskim krilom izmjerili sam vrh poplavnog vala (četiri vodomjerenja), a to je sigurno vrhunac u svim hidrometrijskim svijetima.

Također, treba spomenuti da je na Savi kod Čateža u Sloveniji, 19. 9. 2010. u 11:00, kod vodostaja $H = 855 \text{ cm}$ izmjeren protok od $3384 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Zbog kompliciranosti vodomjerenja na graničnom profilu, sve češće se kao izlazni podatak o količini vode iz Slovenije, koriste podaci sa hidrološke postaje Čatež, a naročito ovaj podatak o izmjerenom protoku od $3384 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, koji je najveći izmjereni protok na analiziranom području sliva rijeke Save.

5. FUNKCIONIRANJE GLAVNIH OBJEKATA ZA REDUCIRANJE VELIKIH I POPLAVNIH VODA

5.1. Preljev Jankomir i rasteretni kanal Sava - Odra

Ključni objekti sustava obrane od poplava grada Zagreba svakako je lateralni preljev u desnom savskom nasipu kod Jankomira i rasteretni kanal Sava – Odra. Preljev Jankomir, relativno jednostavan objekt, po efikasnosti nema konkurenciju u sustavu Srednje Posavlje. Prednost mu je u automatskom aktiviranju i velikoj moći kapacitiranja. Kod planiranja sustava

PP [god]	Protok r. Save		Rasterećenje u kanal
	uzvodni dotok	nizvodni dotok	Sava – Odra
50	3295	2525	770
100	3650	2650	1000
1000	4780	3270	1510

obrane od poplava rijeke Save, preljev Jankomir je imao oznaku prioriteta prvog reda. Redukcija maksimalnih protoka u Zagrebu njegov je prvenstveni zadatak, ali se pozitivni efekti njegovog djelovanja manifestiraju i na nizvodnom toku rijeke Save. Zaštita grada Zagreba od velikih i poplavnih voda rijeke Save dobila je prijedlog rješenja u sklopu obrane od poplava Srednjeg Posavlja. Konceptija obrane od poplava postavljena je u studijama: DS (1967.) i DS (1969.), a u UNDP-u (1972.) je verificirana.

Preljev Jankomir, uzdužna građevina, koja ima sniženje na desnom nasipu Save uzvodno od Zagreba, dužine oko 1000 m, kojom se dio velikih voda Save rasterećuje u rasteretni kanal Sava – Odra i dalje u retenciju Odransko polje. Projektni kapacitet mu je oko $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ kod pojave 100 godišnje vode Save, ima efekt na sniženje vodostaja u Zagrebu, kod ove pojave, za oko 150 cm. Prednost mu je u automatskom aktiviranju i velikoj moći kapacitiranja.

Osnovni je zadatak preljeva Jankomir redukcija



Slika 9: Detalj neznatnog preljevanja na preljevu Jankomir i ulaz u rasteretni kanal Sava- Odra (foto Zlatko Blažević, snimljeno 6. 9. 2012.)

maksimalnih protoka kroz grad Zagreb i na nizvodnom dijelu toka rijeke Save. Rasteretni kanal Sava – Odra, koji je izgrađen u duljini od 31 km prihvaća preljevne količine i transportira ih na nizvodni dio sliva (u postojećem stanju, koristi se prirodni depresivni prostor Odranskog polja), a u konačnom rješenju ulazi u rijeku Savu kod Strelečkog (uzvodno od Siska). Ukupna duljina kanala u konačnom, projektiranom stanju iznosi 51,4 km. Brkić (2000.) je analizirao razdiobu protoka u $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, na preljevu Jankomir (uzvodni i nizvodni dotok), kao i rasterećenje u kanal Sava - Odra, prema sljedećim izračunatim podacima:

Ovako djelomično izgrađen sustav u potpunosti vrši zahtjevanu zaštitu grada Zagreba od poplavnih voda, a to je pokazao i ovaj primjer poplavnih voda iz rujna 2010. godine. Projektna dokumentacija predviđala je da će se rasterećenje velikih i poplavnih voda u rasteretni kanal Sava – Odra događati u prosjeku svake treće godine, što se u eksploataciji objekta nije ostvarilo. Kanal je do sada bio u funkciji sedam puta (1979. 2x, 1980., 1990., 1998., 2010. i 2012.). Mora se napomenuti da je preljev stvarno bio u funkciji više puta, ali voda nije uvijek stigla ući u rasteretni kanal Sava – Odra. Razlog neaktiviranja rasteretnog kanala Sava – Odra je poprečni nasip u kanalu 50 + 000. Ovaj nasip izveden je kao privremeni objekt, kako bi se spriječilo puštanje u funkciju kanala Sava – Odra, kad nije bilo krajnje nužno, zbog izgradnje samog kanala i pratećih objekata i teškoća u prometu koje nastaju pri aktiviranju kanala Sava – Odra. Na [slici 10](#). vidi se neznatno preljevanje na preljevu Jankomir i ulaz u rasteretni kanal Sava – Odra. Na [slici 11](#) prikazan je detalj preljeva Jankomir u funkciji 19. 9. 2010. Detaljni podaci o radu preljeva Jankomir i rasteretnog kanala Sava – Odra, kao i pregled registriranih maksimalnih vrijednosti vodnog vala (datum i vrijeme pojave vrha vodnog vala - H i Q) te povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka - PP u godinama i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) na, za ovu analizu, odabranim hidrološkim postajama u Republici Hrvatskoj prikazani su u [tablici 6](#) Radi usporedbe i boljeg praćenja, pregled registriranih



Slika 10: Detalj preljeva Jankomir u funkciji 19. 9. 2010. Kratofil i dr. (2010.).

Tablica 6: Pregled zabilježenih maksimalnih vrijednosti vodnog vala (datum i vrijeme pojave vrha vodnog vala - H i Q) povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka - PP u godinama i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) na, za ovu analizu, odabranim hidrološkim postajama u Republici Hrvatskoj

VODOTOK	POSTAJA	ZABILJEŽENO			POVRATNI PERIOD PP [god]			H [cm]
		Datum	H [cm]	Q [m ³ s ⁻¹]	50	100	1000	
1	2	3	4	5	6	7	8	10
SAVA [RS]	Jesenice/D*	19.9. 18:00	815	(3700)*	3616	3987	5168	-
SAVA	Drenje Brdovečko	19.9. 18:00	580	(3792)**	-	-	-	-
	Podsused/ž	20.9. 03:00	580	3360	3214	3531	4659	526
	Preljev *** Jankomir	19.9. 04:00	-	-	-	-	-	785
Kanal Sava – Odra	Blato ****	-	-	-	-	-	-	156 197
SAVA	Zagreb	20.9. 02:00	468	2851	2875	3039	3518	454 460
					2772	2953	3526	
					2804	2966	3452	

* Procjena protoka je izrađena na podlozi izvedenih vodomjerenja u danima između 17. i 20. 9 2010; Izvor: Strojani, i dr. (2010.)

** Protok vode od 3792 m³s⁻¹ je ekstrapolirana vrijednost na krivulji protoka na kojoj je najveći izmjereni protok bio 1404 m³s⁻¹.

*** Početak preljevanja: 19. 9. u 04:00, vodostaj na preljevu: 707 cm, vodostaj na postaji Zagreb: 385 cm; Kraj preljevanja.: 20. 9. u 21:00, vodostaj na preljevu: 711 cm, vodostaj na postaji Zagreb: 408 cm;

Preljev je radio 41 sat, maksimalna visina vodenog stupca na preljevu iznosila je 78 cm;

Rastereteni volumen u Odransko polje je oko 45.000.000 m³.

Napomena: kolone 6. 7 i 8.

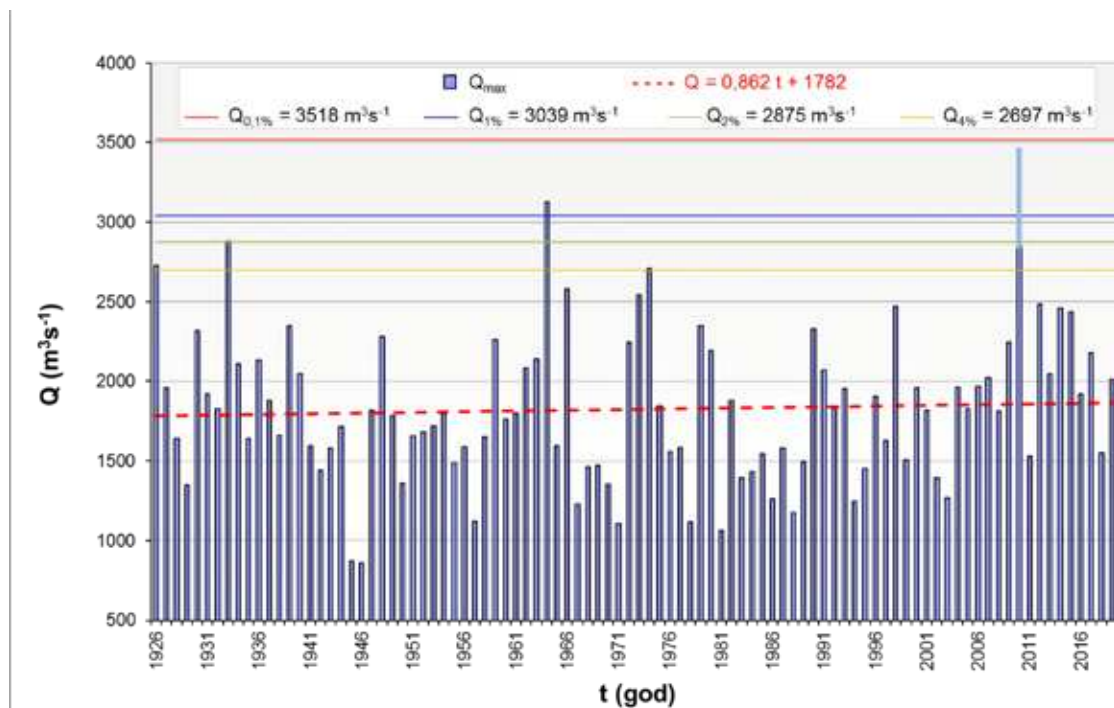
maksimalnih vrijednosti vodnog vala (datum i vrijeme pojave vrha vodnog vala - H i Q) te povratni periodi maksimalnih godišnjih protoka - PP u godinama i pregled mjerenih podataka (datum i vrijeme pojave, vodostaji i protoci) na, za ovu analizu, odabranim hidrološkim postajama u Republici Sloveniji prikazani su u **tablici 5**.

Nakon prvog, prethodnog upozorenja o mogućim obilnim oborinama u R Sloveniji, 16. 9. 2010. u 08.50, veliki vodni val se počeo formirati 18., 19. i 20. 9. i rastao

je velikim intenzitetom. U nedjelju, 19. 9. Sava je na ulaznom profilu u Hrvatsku, kod Drenja Brdovečkog, dostigla do sada nezabilježen maksimalni vodostaj od 580 cm (protok oko 3792 m³s⁻¹). Protok se nastavio kretati prema hidrološkom profilu Podsused/ž, objektima za reduciranje velikih voda: preljev Jankomir i rasteretni kanal Sava - Odra, i prema Zagrebu, gdje je maksimalni vodostaj, H = 468 cm, (Q = 2851 m³s⁻¹) dostignut 20.9.2010. u 02:00. Razlika protoka na postajama Jesenice/Drenje Brdovečko i postaje Zagreb rezultat je

	PP [god]				
	50	100	1000		
Jesenice/D	3616	3987	5168	(1975.-2010.)	VPB d.d. (2012.)
Podsused/ž	3214	3531	4659	(1949.-2014.)	DHMZ (2021.)
Zagreb	2875	3039	3518	(1926.-2015.)	DHMZ (2021.)
	2772	2953	3526	(1979.-2010.)	Bonacci O.; Oskoruš, D. (2011.)
	2804	2966	3452	(1975.-2010.)	VPB d.d. (2012.)

****Na rasteretnom kanalu Sava – Odra, na hidrološkoj postaji Blato izvedena su dva vodomjerenja: 19. 9. kod vodostaja H = 156 cm izmjeren je protok Q = 325 m³ s⁻¹ i 20. 9. 2010. kod vodostaja H = 197 cm izmjeren je protok od 483 m³ s⁻¹. Do sada su bila još dva mjerenja na hidrološkoj postaji Blato: 3. 11. 1990. (H = 76 cm, Q = 91,6 m³ s⁻¹) i 11. 6. 1998. (H = 210 cm, Q = 564 m³ s⁻¹).



Slika 11: Maksimalni godišnji protoci Save kod Zagreba (razdoblje obrade:1926. - 2020.) s ucrtanim linijama - protocima povratnih perioda:1000, 100, 50, i 25 godina (razdoblje obrade: 1926. - 2015.) bez korigiranog maksimalnog protoka od $3454 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. te pretpostavljenim linearnim trendom i njegovom jednažbom

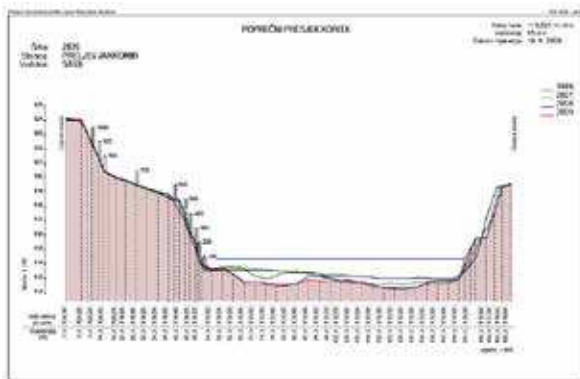
prvenstveno rada preljeva Jankomir i rasteretnog kanal Sava – Odra, ali i transformacije vodnog vala na potezu Save uzvodno od Posuseda/ž, odnosno razlijevanja na dijelu gdje nema izgrađenih nasipa. Može se izvršiti procjena koliko bi iznosio vodostaj Save kod Zagreba da su izgrađeni nasipi do granice sa Slovenijom i da nije postojao preljev Jankomir; ona govori da bi vodostaj na Savi kod Zagreba, umjesto zabilježenih 468 cm, bio 605 cm (Kratofil i dr. 2011.).

Za aktualnu poplavu u 2010. procijenjeno je da je maksimalni protok preko preljeva Jankomir iznosio oko $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U toj procjeni su korištena mjerenja obavljena na vodomjernom profilu Blato u rasteretnom kanalu Sava – Odra dana 19. 9. 2010. popodne, par sati prije pojave maksimalnog vodostaja Save kod Zagreba. Kod vodostaja od 197 cm, korištenjem ADCP uređaja izmjeren je protok u kanalu od $483 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Kad se vrijednosti od $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ doda izmjereni protok za profil

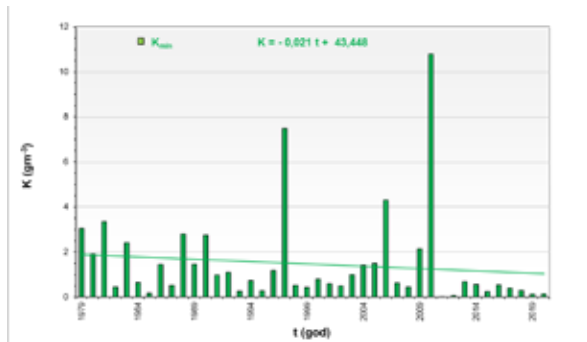
Save kod Zagreba u iznosu od $2854 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ proizlazi da bi kroz njega 20. 9. 2010., da nije bilo preljeva Jankomir i rasteretnog kanala Sava - Odra, protekla maksimalna količina vode od $3454 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Radi se o protoku većem za $328 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ od onog koji se pojavio u listopadu 1964. godine (Bonacci i Oskoruš, 2011).

Na slici 12 prikazani su maksimalni godišnji protoci Save kod Zagreba u razdoblju: 1926. - 2020., $N = 95$ godina., s ucrtanim linijama - protocima povratnih perioda:1000, 100, 50, i 25 godina (razdoblje obrade: 1926. - 2015.bez korigiranog maksimalnog protoka od $3454 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), te pretpostavljenim linearnim trendom i njegovom jednažbom. Ako postavimo pet najvećih vrijednosti maksimalnih godišnjih godišnjih protoka prema registriranim vrijednostima na postaji Zagreb (preljev Jankomir u funkciji, izgrađen 1979.) dobijemo sljedeći redoslijed: 1964. ($3126 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1933. ($2877 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 2010. ($2851 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1926 ($2726 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1974. ($2709 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Da nije izgrađen preljev Jankomir, redoslijed maksimalnih godišnjih protoka bio bi sljedeći: 2010. (korigirani protok $3454 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1964. ($3126 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1933. ($2877 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), 1926. ($2726 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) i 1974. ($2709 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). I s ovim redoslijedom se vidi izuzetni značaj preljeva Jankomir i rasteretnog kanala Sava – Odra. Interesantni su podaci za godine: 1926. i 1933., koje su dosta "nepoznate" po pojavama velikih i poplavnih voda, i za koje nismo našli podatke o vodomjerenjima.

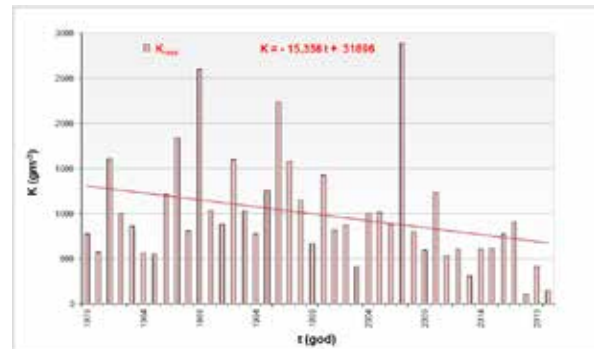
U članku: Kalinić i dr. (2018.) se sa pozicije Ureda za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba, u području voda, prvo se navode opasnosti od štetnog djelovanja voda, i drugo o vodi kao prirodnom resursu neophodnom za svakodnevni život.



Slika 12: Poprečni profili na Savi kod preljeva Jankomir (uzdužna građevina) snimljeni u godinama: 1999., 2007., 2008., 2009.



Slika 13: Minimalne godišnje koncentracije suspendiranog nanosa na Savi kod Podšuseda u razdoblju: 1979. - 2020.



Slika 14: Maksimalne godišnje koncentracije suspendiranog nanosa na Savi kod Podšuseda u razdoblju: 1979. - 2020.

5.2. Redizajniranje postojećeg preljeva Jankomir

Tijekom 2000. geodetski su snimljeni svi profili hidroloških postaja na Savi u Hrvatskoj. Ovi snimci su pokazali produbljivanje korita na skoro svim postajama, a time indirektno i na cijelom toku. Kao uzrok intenzivne devastacije riječnog korita možemo navesti i dugogodišnje radove na regulaciji Save koja je od širokog i plitkog profila svedena na usko i duboko korito, a u kombinaciji s presijecanjem meandara stvoren je koncentriran tok, s velikim padovima i brzinama, koji ima značajno razorno djelovanje. Neka istraživanja pokazala su i smanjeni donos nanosa u Savu što se objašnjava protuerozionim radovima i značajnom urbanizacijom u slivu, kao i izgradnjom: 3 HE na Gornjoj Savi, 6 HE i NE Krško s pragom na Donjoj Savi te planiranom izgradnjom 10 HE na Srednjoj Savi. Znači 20 elektrana na Savi biti će kroz neko vrijeme, u funkciji u Republici Sloveniji. Negativno je i djelovanje praga kod TE - TO Zagreb.

Promjene koje se javljaju u slivu i koritu vodotoka, a koje bitno utječu na promjene režima voda i nanosa opisane su u člancima: Bonacci O.; Trninić, D. (1989.), Bonacci O.; Trninić, D. (1991.) te u člancima: Trninić (1991.) i Trninić (1997.).

Preljev Jankomir u današnjem stanju ne rasterećuje velike vode u kanal Sava – Odra, kako je predviđeno projektom obrane od poplava. Preljev se ne počinje aktivirati kod predviđenih $1900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ u Savu, nego kod oko $2350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Bonacci i Ljubenkov (2008.) su na jednostavan i vrlo efikasan način analizirali morfološke promjene na uzvodnom i nizvodnom dijelu preljeva Jankomir pomoću dvije krivulje protoka za 1964. i 2004., kao i njihov utjecaj u zaštiti od velikih i poplavnih voda Save kod Zagreba. Analizom godišnjih maksimalnih vodostaja i protoka u razdoblju: 1926. - 2004. kao i za sedam podrazdoblja, praćene su značajne morfološke promjene na hidrološkom profilu Save kod Zagreba.

Poseban problem je konstantna i prekomjerna eksploatacija šljunka, bez da se poznaje režim nanosa u Savi i pritokama.

Na slici 12 prikazani su poprečni profili na Savi kod Preljeva Jankomir (uzdužna građevina) snimljeni u godinama: 1999., 2007., 2008. i 2009. Iz tih podataka se vidi da na ovom profilu imamo produbljivanje dna korita od 1,5 do 2,0 m.

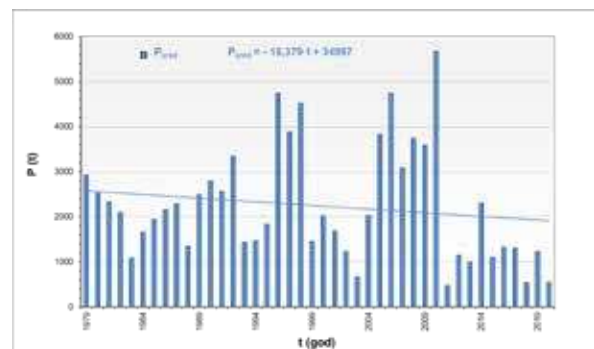
U posljednje vrijeme sve se češće uočava da je razlog sve manje frekvencije rasterećenja, kontinuirano i intenzivno produbljivanje dna rijeke Save. U novim okolnostima sniženja dna Save, koje u blizini preljeva iznosi oko dva metra, preljev počinje funkcionirati kasnije, a zbog smanjenog stupca vode i kapacitiranje je smanjeno u odnosu na stanje prije dvadesetak godina.

Izrađene su studije o Uređenju hidrotehničkog čvora Jankomir, a njihovi zaključci su pokazali da preljev Jankomir u postojećim uvjetima uređenja rijeke Save ne funkcionira prema postavljenim uvjetima obrane od poplava Srednjeg Posavlja, te se pristupilo izradi novih rješenja za uređenje hidrotehničkog čvora Jankomir, kako bi se osigurali uvjeti za planiranu distribuciju voda unutar hidrosustava Srednjeg Posavlja (Brkić 2000.).

Tehničko rješenje uređenja čvora Jankomir predloženo je u tri varijante:

- redizajniranje postojećeg objekta preljeva – nekontrolirana distribucija voda;
- izgradnja ustave – kontrolirana distribucija voda;
- izgradnja ustave i rekonstrukcija dijela preljevnog nasipa.

Odavno su Srebrenović i Pilar (1987., reprint 2000.)



Slika 15: Srednji godišnji pronos suspendiranog nanosa na Savi kod Podšuseda u razdoblju: 1979. - 2020.

istaknuli potrebu renoviranja Studije UNDP (1972.). Nova studija, koja u današnjim geopolitičkim uvjetima, treba na jedan drugi način definirati korištenje i zaštitu voda u slivu rijeke Save. U tim razmišljanjima, Potočki i dr. (2021.) predlažu hidrološki pristup prirodnih rješenja u ublažavanju velikih i poplavnih voda, navodeći zeleni nasuprot sivom pristupu.

6. ANALIZA REŽIMA NANOSA

Režim nanosa znači stanje količina i kakvoće nanosa u slivu rijeke Save, u prostoru i vremenu na koje utječu ljudske djelatnosti i/ili prirodne promjene.

Kada se govori o zaštiti vodotoka, onda se misli o kontinuiranom produbljivanju korita rijeke Save, snižavanju vodostaja podzemne vode i ugroženosti vodocrpilišta pitke vode, iskorištenosti hidroenergetskog potencijala i dr. Sava i savski aluvij najznačajniji su izvor vode iz kojeg se opskrbljuje grad Zagreb i ostali gradovi i općine na slivnom području Grada Zagreba. Izravno prihranjivanje podzemnih voda iz rijeke Save čini 98 % ukupno raspoložive podzemne vode te, je zajedno sa povoljnim hidrogeološkim parametrima vodonosnog sloja rezultiralo mogućnosti iskoroštavanja podzemnih voda bunarima i crpilištima velikog kapaciteta: (Husarić i dr. 2000.). Analiza vodostaja na nizu mjernih mjesta podzemne vode pokazala je pad vodostaja u razdoblju 1972. - 1994. od 1,5 do 3,3 m (Brkić 2000.).

Na teritoriju Hrvatske na 21 hidrološkoj postaji, a od toga su 10 u slivu rijeke Save, mjeri se samo suspendirani nanos. Nažalost, zbog tehnički zahtjevnih mjerenja i pomanjkanja financijskih sredstava, trenutno se nigdje ne mjeri vučeni nanos.

Na slikama 13. i 14. prikazane su minimalne i maksimalne godišnje koncentracije suspendiranog nanosa na Savi kod Podsuseda u razdoblju: 1979. – 2020. Na slici 15 prikazan je srednji godišnji pronos suspendiranog nanosa na Savi kod Podsuseda u razdoblju: 1979. – 2020. Iz pretpostavljenog linearnog trenda se vidi smanjivanje minimalnih i maksimalnih godišnjih koncentracija suspendiranog nanosa (slike 13 i 14) te smanjivanje srednjeg godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa (slika 15).

Važno je spomenuti da se od 4. 9. 2015. ADCP-om,



Slika 16: Detalj jednog od najvećih poplavnih, pa kasnije velikog vodnog vala Save kod Zagreba, (foto: D. Pongračić/Cropix), snimljeno 20. 9. 2010.)

paralelno s mjerenjem protoka, mjeri i koncentracija suspendiranog nanosa.

U mjerenjima i analizama režima nanosa konačno se poduzimaju neke akcije. Savska komisija izradila je Protokol o upravljanju nanosom uz Okvirni sporazum o slivu rijeke Save, čime je dodatno potvrđena potreba za učinkovitom suradnjom između država stranaka za promicanjem rješenja u vezi s održivim upravljanjem nanosom (SSM). Kako bi se odgovorilo na te potrebe, pokrenut je projekt *Razvoj praktičnih smjernica za održivo upravljanje nanosom, koristeći sliv rijeke Save kao ogledni primjer*, na temelju inicijative Ureda UNESCO-a u Veneciji, a u suradnji s Međunarodnom UNESCO-vom inicijativom za nanos (ISI), Europskom mrežom za nanos (SedNet) te Savskom komisijom (ISRBC). Pri tome se astojalo razviti i potvrditi praktične smjernice o tome kako ostvariti plan za održivo upravljanje nanosom na razini riječnog sliva, koristeći sliv rijeke Save kao ogledni primjer (Savska komisija 2015). Projekt *Procjena bilance nanosa za rijeku Savu (BALSES)* provela je temeljna radna skupina koja je analizirala bilans nanosa za glavni tok rijeke Save, uzimajući u obzir unos iz ključnih pritoka.

Da nisu izrađeni Objekti za redukciju velikih i poplavnih voda: preljevi Jankomir i dio kanala Sava – Odra, slika 16, bila bi bitno drugačija.

7. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Problemi koji su se pojavili tijekom ove analizirane poplave u rujnu 2010. pokazali su svu kompleksnost i dinamiku koja zahtijeva mnogo podataka, vrlo stručne kadrove i financijsku potporu.

Nema apsolutne obrane od poplava i uvijek postoje ekstremi ekstrema.

Velikih i poplavnih voda rijeke Save do hidrološke postaje Zagreb bilo je u prošlosti, ima ih u sadašnjosti, a bit će ih i u budućnosti.

Gradili su se, grade se i gradit će se, razni sustavi zaštite od štetnog djelovanja voda koji moraju biti u domeni realnosti i raspoloživih financijskih sredstava, da bi se, što je više moguće, smanjile izravne i neizravne štete.

Neka istraživanja pokazala su i promjene u režimu nanosa, kao što je smanjen donos nanosa u Savu, što se objašnjava protuerozijskim radovima u slivu, kao i izgradnjom HE na Savi, kao i praga uzvodno od NE Krško u Republici Sloveniji i praga kod TE-TO u Zagrebu.

Prije više od 50 godina izrađena je UNDP-ova Studija regulacije i uređenja rijeke Save u Jugoslaviji, a do danas je realizirano i izvedeno oko 40 % objekata.

Prije više od 40. godina izrađena je Vodoprivredna osnova grada Zagreba (1982.), a prije 30 godina izrađene su: Izmjene i dopune vodoprivredne osnove. Ili ovakav tip dokumenata nije potreban, ili treba ići na neke drugačije dokumente koji bi pratili, analizirali i proicirali kako se adaptirati na sve veću dinamiku, kompliciranost i potrebe u procesima vezanim uz vode.

Iako svi mislimo da se klimatske promjene tiču nekoga drugoga, znanstvenici upozoravaju da nitko neće biti pošteđen utjecaja globalnog zatopljenja i klimatskih

promjena.

Plan prilagođavanja klimatskim promjenama za sliv Save (WATCAP), program financiran sredstvima World Bank (2015.), na bazi prošlog ili baznog scenarija: 1961. - 1990. daje Procjenu srednjih, minimalnih i maksimalnih sezonskih i godišnjeg otjecanja za blisku budućnost: 2011. - 2040., kao i za daljnju budućnost: 2041. - 2070.

Potreba za školovanjem specijaliziranih kadrova, na svim razinama u: hidrotehnici, hidrologiji i meteorologiji, klimatologiji, geologiji, kao i u svim drugim znanostima, koje na bilo koji način imaju dodira s vodom, postaje

jedan od ključnih problema.

Priroda ima svoje zakonitosti, čovjek je "zadužen" za antropogene utjecaje, a sve intenzivnije i znanstveno dokazane klimatske varijabilnosti i klimatske promjene, definiraju ovu problematiku još zahtjevnijom i složenijom. Ovu priču o vodi možda najbolje opisuje sljedeća misao:

**VODA ZA ŽIVOT,
ZNAJTE ZA VODU.**



LITERATURA

ARSO 2010.a Državna meteorološka služba: Poročilo o izjemno obilnih padavinah od 16. do 19. septembra 2010, Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) Ljubljana.

ARSO 2010.b Sektor za analizo in prognozo površinskih voda: *Poplave v dnevi od 17. do 21. septembra 2010*. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), Ljubljana.

Brkić, B. 2000. Tehničko rješenje uređenje hidrotehničkog čvora Jankomir. *Zbornik radova okruglog stola; Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima*" (ur. D. Trninić), Slavonski Brod, 393-402.

Bonacci, O.; Trninić, D. 1989.: Nove hidrološke, morfološke i hidrogeološke promjene Save kod Zagreba. *Zagrebačka vodoprivreda*, 8(30), 20-26.

Bonacci, O.; Trninić, D. 1991.: Hydrologische, durch die Aktivität des Menschen hervorgerufene Veränderungen im Flussgebiet der Sava bei Zagreb. *Wasserwirtschaft* 81(4), 171-175.

Bonacci, O.; Ljubenkov, I. 2008.: Changes in flow conveyance and implication for flood protection, Sava River, Zagreb. *Hydrological Processes*, 22(8), 1189-1196. Bonacci O.; Oskoruš, D. 2011: Hidrološka analiza sigurnosti Zagreba od poplave vodama rijeke Save u novim uvjetima. *Hrvatske vode*, 19(75), 13-24.

DHMZ 2021: *Arhiva i banka hidroloških podataka*, Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske (DHMZ RH), Zagreb.

DHMZ 2012.: *Godišnje izvješće o mjeranju i obradama nanosa na Savi u 2011. godini*, Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske (DHMZ RH), Zagreb.

DS 1967.: *Obrana od poplave Zagreba, Siska i Karlovca*, Direkcija za Savu, Zagreb.

DS 1969.: *Obrana od poplave Gornjeg Posavlja*, Direkcija za Savu, Zagreb.

Husarić, J.; Havoić, M.; Jelovečki, D. 2000.: Opća vodnogospodarska problematika grada Zagreba s naglaskom na Savu. *Zbornik radova okruglog stola; Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima*" (ur. D.

Trninić), Slavonski Brod, 313-328.

Kalinić, P.; Bakran, P.; Guberina, B. 2018.: *Water management in the City of Zagreb*, 19 (1-2)...

Kratofil, L.; Havoić, M.; Juriša, Z. 2011.: Poplave uz rijeku Savu. *Hrvatska vodoprivreda*, 19 (194), 37-43.

Potočki, K.; Bekić, D.; Bonacci, O.; Kulić, T. 2021: *Hydrological aspects of nature-based solutions in flood mitigation in the Danube River basin in Croatia: green vs. grey approach. The Handbook of Environmental Chemistry* (ur. C. S. S. Ferreira; Z. Kalantari; T. Hartmann; P. Pereira), 1-26, Springer Nature, Berlin, Heidelberg.

Srebrenović, D.; Pilar, M. 2000.: Hidrološki aspekt rijeke Save u razvojnim vodoprivrednim planovima. *Zbornik radova okruglog stola; Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima*" (ur. D. Trninić), Slavonski Brod, 13-38.

SK (2015.): *Procjena bilanse nanosa za rijeku Savu (BALSES)*, ISRBC (Međunarodna komisija za sliv rijeke Save, Savska komisija – SK), Zagreb.

Strojan, i dr. 2010.: *Poplave v dnevi od 17. do 21. septembra 2010*. 21. Mišičev vodarski dan 2010, Maribor

Terek, B., 2007: Određivanje protoka metodom referentne brzine. *Hrvatska vodoprivreda* 16, 177-178, 43-49.

VPB d.d. 2012.: *Matematički model Sustava obrane od poplava Srednje – Posavlje – kalibracija i verifikacija na velike vodne događaje u 2010*. Vodoprivredno projektni biro, d.d., Zagreb.

Trninić, D. 1997: Hydrological analysis of high flows and floods in the Sava River near Zagreb Croatia. *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control: IAHS Publication No.239*. 51-58.

Trninić, D. 2014.: 50 godina od katastrofalne poplave Save kod Zagreba, *Hrvatska vodoprivreda*, 22, (29), 56-63.

UNDP 1972.: *Studija regulacije i uređenja Save u Jugoslaviji – Konačni izvještaj* – Konzultantske firme: Polytechna – Hydroprojekt – Carlo Lotti & C., Praha – Roma.

https://hr.wikipedia.org/wiki/NE_KRŠKO: Poplavne vode u blizini NE Krško 2010.

A CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE SAVA RIVER FLOODS AND HIGH WATERS IN SEPTEMBER 2010 TO ZAGREB

Abstract. The Slovenian Environment Agency (ARSO) issued advance warning about possible heavier rain on 16. 9. 2010 at 08:50 am, which read: "Heavy autumn rain is expected in Slovenia by the end of the week". Since the forecast became a reality, it was necessary to declare the highest (red) alarm (according to Metealarm criteria) for the period from 17. 9. 2010 to 19. 9. 2010. The paper contains a detailed analyses of extremely heavy rain. The analyses of hydrological conditions in the Republic of Slovenia continue with Hydroalarm, which contains expected flood hazard states, all important hydrological data on high and floods waters, including the recorded maximum water wave values (date and time of the occurrence, water levels, discharges), return periods of maximum annual discharges (for 50, 100 and 1000 year return periods), as well as an overview of measured data (date and time of the occurrence, water levels, discharges), at hydrological stations selected for this analysis. Only 3 days and 9 hours passed between the advance warning on 16. 09. 2010 to the flood wave occurrence at the entry into the Republic of Croatia on 19. 9. 2010 at 6 pm.

The key flood defence facilities for the City of Zagreb are definitely the lateral canal in the right Sava dike at Jankomir and the Sava - Odra relief canal. The analysis of the flood wave in September 2010 included the calculation of the water quantity that flowed over the Jankomir weir. When the measured discharge at Zagreb is added to this value, the result is the largest, corrected discharge in the analysed period in 95 years. Due to various circumstances, the Jankomir weir is not sufficient for the design values and must be redesigned. The sediment regime, which is a very important component for every basin and every watercourse, is in the analysed area of the Sava basin only represented by data on suspended sediment. Unfortunately, the bed load is not measured anywhere at all.

Key Words: floods, high waters, Sava River, meteorology, hydrology, weir, canal

ANHANG ZUR ANALYSE VON ÜBERSCHWEMMUNGEN UND HOCHWASSER DES SAVA-BECKENS BIS ZAGREB IM SEPTEMBER 2010

Zusammenfassung. Am Donnerstag, den 16. September 2010, gab das Umweltamt der Republik Slowenien um 8:50 Uhr die erste Frühwarnung vor möglichen starken Niederschlägen mit folgendem Inhalt bekannt: "Bis zum Ende der Woche werden in Slowenien starke Herbstniederschläge erwartet." Später stellte sich heraus, dass nach Metealarm-Kriterien die höchste (rote) Warnstufe für den Zeitraum vom 17. bis 19. September 2010 hätte bekanntgegeben werden müssen. Der hier veröffentlichte Beitrag enthält eine detaillierte Analyse dieser extrem starken Regenfälle. Die Analysen der hydrologischen Bedingungen in Slowenien werden mit Hidroalarm fortgesetzt, in den Prognosen zum Stand der Überschwemmungsgefahr wiedergegeben sind. Alle wichtigen hydrologischen Daten zu Überschwemmungen und Hochwasser geben die Maximalwerte der Wasserwelle (Datum und Zeitpunkt des Auftretens, Wasserstand, Abflussmenge), die Wiederholungsperioden maximaler Abflussmengen in einem Jahr (für Wiederholungsperioden PP = 50, 100 und 1000 Jahre) sowie eine Übersicht der Messdaten (Datum und Uhrzeit des Auftretens, Wasserstand und Durchflussmenge) an den dafür ausgewählten Messpunkten. Von der vorherigen Warnung am 16. September 2010 bis zum Auftreten der Flutwelle am Übergangspunkt nach Kroatien am 19. September 2010 um 18:00 Uhr vergingen nur 3 Tage und 9 Stunden.

Die wichtigsten Elemente des Hochwasserschutzsystems der Stadt Zagreb sind zweifellos der Seitenkanal im rechten Save-Damm bei Jankomir und der Sava-Odra-Entlastungskanal. Im Fall der analysierten Überschwemmungswelle im September 2010 wurde die Wassermenge berechnet, die über die Jankomir-Überlaufrinne floss – wenn man zu diesem Wert den gemessenen Abflusswert bei Zagreb addiert, ergibt sich der höchste, korrigierte Abflusswert im analysierten Zeitraum von 95 Jahren. Jedoch aufgrund verschiedener Einflüsse entspricht der Jankomir-Überlauf mit seiner Konstruktionsart nicht mehr den heutigen Anforderungen und muss umgebaut werden. Als eine weitere bedeutende Komponente in jedem Wassereinzugsgebiet und Wasserlauf wird das Sedimentregime im analysierten Sava-Becken erwähnt, es wird jedoch nur mit Daten der suspendierten Sedimente dargestellt. Leider wird der Sedimenttransport nirgendwo erfasst.

Schlüsselwörter: Überschwemmung, Hochwasser, der Fluss Sava, Meteorologie, Hydrologie, Überlauf, Kanal

