

Prethodno priopćenje | Preliminary Report | UDK 627.51(497.5 Zagreb)
Primljeno (Received): 1. 1. 2011.; Prihvaćeno (Accepted): 8. 3. 2011.

HIDROLOŠKA ANALIZA SIGURNOSTI ZAGREBA OD POPLAVE VODAMA RIJEKE SAVE U NOVIM UVJETIMA

**Prof. dr. sc. Ognjen Bonacci, dipl.
ing. građ.**
Građevinsko-arhitektonski fakultet
Sveučilišta u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split
obonacci@gradst.hr

Dijana Oskoruš, dipl. ing.
Državni hidrometeorološki zavod
Grič 3, 10000 Zagreb

Velike vode rijeke Save na potezu od slovensko-hrvatske granice do Siska, koje su se javile u drugoj polovici rujna 2010. godine, ukazale su na potrebu preispitivanja postojećeg sustava obrane od poplava. S tim ciljem u radu je iznesena hidrološka analiza nizova karakterističnih (prije svega maksimalnih, ali i minimalnih i srednjih) godišnjih vodostaja i protoka Save na vodomjernim profilima Zagreb i Podsused u razdoblju od 1926. do 2010. Naglasak je stavljen na izučavanje uloge preljeva Jankomir kao ključnog objekta obrane grada Zagreba od poplava. Primjenom logaritamsko normalne raspodjele određeni su povratni periodi vodostaja i protoka koji su se javili tijekom katastrofalne poplave 1964. godine i u rujnu 2010. godine. U posebnom poglavlju izvršena je detaljna analiza velike vode iz rujna 2010. Ukazano je na problem nedovoljno pouzdanih određivanja protoka pri prolasku velikih voda na analiziranom potezu. Naglašeno je da je nemoguće izgraditi apsolutno siguran sustav obrane od poplava, ali je moguće i nužno poduzeti mjere koje će na minimum svesti štete od poplava. Sustav ranog uzbunjivanja koji počiva na kvalitetnoj prognozi u realnom vremenu osnovica je za postizanje tog cilja. U radu su predložene mjere koje bi trebalo poduzeti da se poboljša točnost prognoze u realnom vremenu.

Ključne riječi:
poplava, hidrologija, vodostaj, protok, Sava kod Zagreba

1. UVOD

Velike vode rijeke Save, na potezu od granice sa Slovenijom do Siska, koje su se pojavile u rujnu mjesecu 2010. upozorile su na neophodnost suvremenog i sveobuhvatnog razmatranja i revalorizacije funkcioniranja sustava zaštite od poplava grada Zagreba, ali i šireg uzvodnog i nizvodnog prostora. S tom svrhom u ovom su radu izvršene hidrološke analize karakterističnih vodostaja i protoka rijeke Save prvenstveno na vodomjernom profilu Zagreb, ali i na nekim uzvodnim profilima značajnim za formiranje valova velikih voda pa prema tome i za pouzdano funkcioniranje sustava obrane od poplava.

Tijekom posljednjih stotinjak godina došlo je do velikih i nepovratnih promjena u koritu i na slivu rijeke Save koje su snažno utjecale na promjene hidroloških karakteristika Save kod Zagreba, kao i na cijeloj dionici Save od granice sa Slovenijom do Siska. U radu su analizi podvrgnute ne samo velike vode, već i male i srednje vode, stoga jer i one mogu biti indikator za ponašanje velikih voda.

Za neke od doista brojnih i različitih antropogenih utjecaja na hidrološki režim Save kod Zagreba, kao na primjer puštanje u rad preljeva Jankomir, zna se točno vrijeme početka, čime je ispunjena prva pretpostavka o mogućnosti utvrđivanja njegovog utjecaja na sigurnost obrane grada Zagreba od poplava. Međutim, prije, poslije, ali i usporedo s funkcioniranjem preljeva Jankomir odvijali su se, a odvijaju se i danas (izgradnja pregrada i hidroenergetsko korištenje Save u Sloveniji) brojni dugotrajniji i sporiji antropogeni i prirodni procesi (Smith i Ward, 1998.). Regulacijski, vodno gospodarski i protueroziojski radovi smanjili su produkciju nanosa i drastično izmijenili njegov prirodni pronos. To je na potezu Save od granice sa Slovenijom do nizvodno od Zagreba uzrokovalo povećanje erozijskih procesa i produbljivanje korita rijeke, što je pak značajno utjecalo na promjenu režima velikih voda, a time i na funkcioniranje do sada izgrađenog sustava obrane od poplava (Svensson i sur., 2006.).

Brojni i nedovoljno kontrolirani te vrlo dinamični antropogeni i prirodni procesi unose goleme i teško objašnjive „šumove“ u hidrološke analize, onemogućavajući pouzdano predviđanje ponašanja procesa u budućnosti i prognoziranja karakteristika velikih voda u realnom vremenu (Bonacci i Ljubenković, 2003., 2004., 2008.).

Zbog antropogenih zahvata, ali i prirodnih procesa koji se u analiziranom prostoru posebno dinamično manifestiraju prilikom prolazaka valova velikih voda nije moguće detaljno i pouzdano utvrditi prave razloge promjena hidrološkog i morfološkog režima rijeke Save u širem području grada Zagreba (Kratofil, 2000.). Interakcija među njima stalna je i vrlo složena. Za njezino potpuno shvaćanje neophodno je raspolagati s mnogo više pouzdanih i kontinuirano mjerenih različitih (hidroloških, hidrauličkih, geomehaničkih, geomorfoloških i drugih) parametara.

Točna prognoza maksimalnih protoka i vodostaja Save preduvjet je za organiziranje učinkovitog sustava ranog uzbunjivanja koji ne bi smanjio opasnost od poplava, ali bi zasigurno smanjio štete od njih. Činjenica je da nitko i nigdje nije mogao spriječiti poplave, ali je mogućnost ublažavanja šteta znatno povećana dobrom organizacijom sustava ranog uzbunjivanja koji definitivno i prije svega počiva na pouzdanim hidrološkim prognozama protoka i vodostaja u realnom vremenu.

Skoro 46 godina je prošlo od katastrofalne poplave Zagreba. Lekcije naučene 1964. godine nažalost su izbljedile, ali su se i uvjeti značajno izmijenili (Pilar i sur., 1994.). Poplava koja se javila u rujnu 2010. godine ukazala je da se postojeći sustav obrane od poplave (kako njegove strukturne tako i nestrukturne komponente) mora preispitati te da mu se mora pristupiti na nov, suvremen, interdisciplinarni i holistički način (Pinter, 2005.). Cilj uvodno iznesenih stavova je ukazivanje na složenost nastavno tretirane problematike, ali i ukazivanje na činjenicu da se s postojećim podacima ne mogu dati svi neophodno potrebni odgovori. Cilj ovog rada nije nikoga kritizirati ili optuživati, već mu je želja pomoći u stvaranju sigurnijeg i suvremenijeg sustava obrane od poplave, prije svega grada Zagreba.

2. ANALIZA KARAKTERISTIČNIH GODIŠNJIH VODOSTAJA SAVE

Cjeloviti fenomen, a prije svega doseg svake poplave, najjasnije, najizravnije pa i najpreciznije je opisan maksimalnim vodostajem koji se pojavio na pojedinom mjestu. Unatoč toj činjenici maksimalni se vodostaji u praksi rjeđe analiziraju od maksimalnih protoka. Pri tome se zanemaruje činjenica da je svaki vodostaj, pa i onaj maksimalni, moguće izmjeriti s istom visokom točnošću (od ± 1 do ± 4 cm). Točnost određivanja protoka, osobito onih koje se javljaju kod velikih voda i prilikom poplava često je manja od $\pm 10\%$, što na primjer u slučaju Save kod Zagreba iznosi oko ± 300 m³/s. S ciljem cjelovitijeg opisivanja složenog fenomena velikih voda i poplava u ovom radu analizirani su i nizovi maksimalnih godišnjih vodostaja i maksimalnih godišnjih protoka.

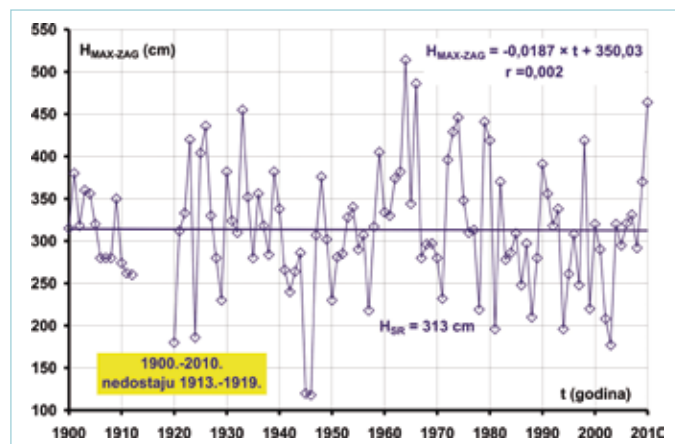
Na vodomjernoj stanici Zagreb raspoloživo se s mjerenim podacima vodostaja od 1900. do 2010. godine uz prekid od 1913. do 1919. Na slici 1 je dat grafički prikaz niza maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba u razdoblju 1900.–2010. (nedostaju podaci za 1913.–1919.). Urtan je i linearni trend te je proračunat koeficijent linearne korelacije čija vrijednost iznosi $r=0,002$. Njegova niska i statistički neznčajna vrijednost svjedoči o tome da na analiziranom profilu u toku cijelog dvadesetog i prvih jedanaest godina dvadeset prvog stoljeća nije došlo do pojave nikakvog trenda u nizu maksimalnih godišnjih vodostaja. To je donekle iznenađujuće, stoga

jer su u tom razdoblju izvršeni doista veliki regulacijski radovi na koritu rijeke Save u širem području Zagreba. Izgrađeni su novi značajno veći i viši nasipi, a od 1979. godine u funkciju je preljev Jankomir. Osim toga, dno se korita Save na profilu Zagreb značajno produbilo čak više od 3 m. Činjenica je da sve navedeno nije uzrokovalo pojavu nijedne vrste trenda. Maksimalni godišnji vodostaj koji se pojavio u rujnu 2010. godine bio je treći po redu u analiziranom razdoblju. Od njega su bili viši vodostaji 1964. godine te onaj iz 1966. godine.

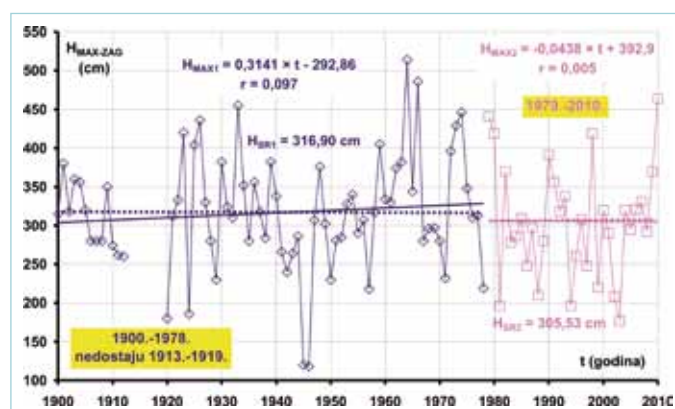
Na slici 2 ucrtan je isti niz kao i onaj sa slike 1, s tim da su u ovom slučaju prikazana dva podniza. Prvi se odnosi na podrazdoblje 1900.-1978. (nedostaju podaci 1913.-1919.), dok se drugi odnosi na podrazdoblje 1979.-2010. Podjela je načinjena s ciljem da se izučiti utjecaj funkcioniranja preljeva Jankomir u podrazdoblju 1979.-2010. na nizove maksimalnih vodostaja Save kod Zagreba. Uočava se da je u prvom podrazdoblju prosječni maksimalni vodostaj iznosio 316,90 cm te da je bio za 11,37 cm viši od prosječnog maksimalnog godišnjeg vodostaja koji je izmjeren u drugom podrazdoblju. Treba naglasiti da je u drugom podrazdoblju preljev Jankomir bio aktivan samo u pet navrata i to 1979., 1980., 1990., 1998. i 2010. godine. Za pretpostaviti da je spomenuta razlika od 11,37 cm rezultat upravo funkcioniranja preljeva Jankomir, ali se ne smije zanemariti ni utjecaj snižavanja dna korita Save kod Zagreba. Provjera homogenosti drugog podniza u razdoblju 1979.-2010. ukazala je da je on homogen. Iz toga bi se moglo zaključiti da na maksimalne godišnje vodostaje Save kod Zagreba nije utjecala izgradnja praga u koritu rijeke Save kod zagrebačke toplane (TETO Zagreb) početkom 1990. godine.

Analizom nizova minimalnih godišnjih vodostaja moguće je ustanoviti postojanje promjena dna korita. S tim ciljem je dat njihov grafički prikaz na slici 3 na kojem je moguće uočiti postojanje sljedeća četiri podrazdoblja sa statistički različitim prosječnim vrijednostima minimalnih godišnjih vodostaja. U prvom podrazdoblju od 1900. do 1910. uočava se trend opadanja minimalnih godišnjih vodostaja. U drugom i najdužem od 1911. do 1974. (nedostaju podaci iz razdoblja 1913.-1919.) trenda nema, a prosječni minimalni godišnji vodostaj 120,3 cm niži je od onog u prvom podrazdoblju. U trećem podrazdoblju od 1975. do 1993. trend opadanja je snažno izražen, a prosječna vrijednost minimalnih godišnjih vodostaja pala je za daljnjih 101,8 cm. Najmanja vrijednost minimalnog godišnjeg vodostaja Save kod Zagreba opažena je 24. listopada 1993. godine te je iznosila -340 cm ili 108,88 m n.m. Trend opadanja zaustavljen je 1994. godine te se do 2009. javlja trend porasta nizova minimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba.

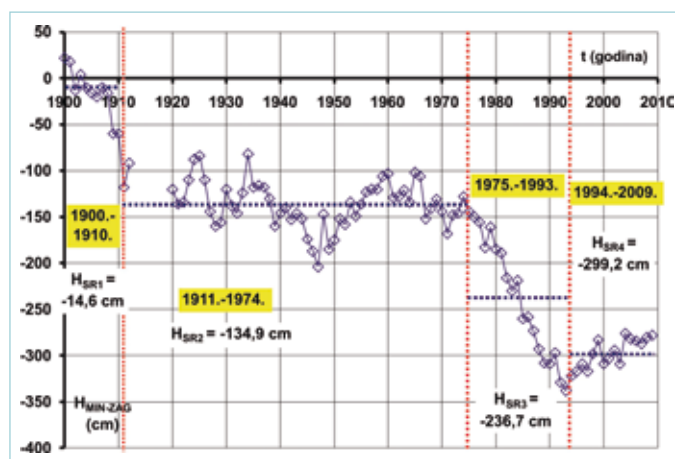
Bitno je uočiti da opadanje dna korita od skoro 3 metra nije utjecalo na snižavanje maksimalnih godišnjih vodostaja. Činjenicu da je proces produbljivanja dna Save kod Zagreba zaustavljen 1994. godine te da je od tada započeo proces podizanja dna korita većina stručnjaka



Slika 1: Niz maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba u razdoblju 1900.-2010. (nedostaju podaci za 1913.-1919.) s ucrtanim pravcem linearnog trenda i koeficijentom linearne korelacije

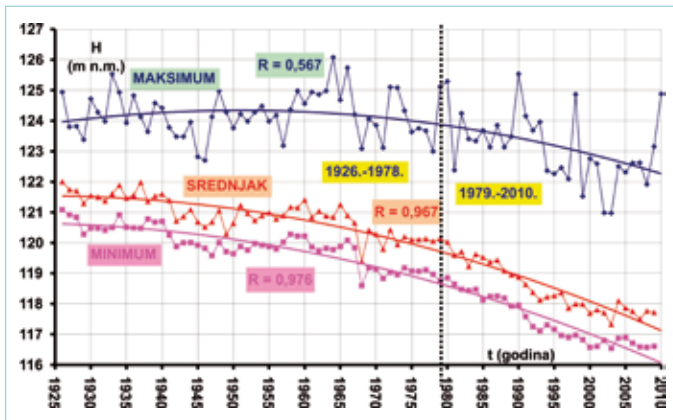


Slika 2: Dva podniza maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba za podrazdoblje prije (1900.-1978.) i poslije (1979.-2010.) izgradnje preljeva Jankomir s ucrtanim pravcima linearnih trendova i koeficijentima linearne korelacije

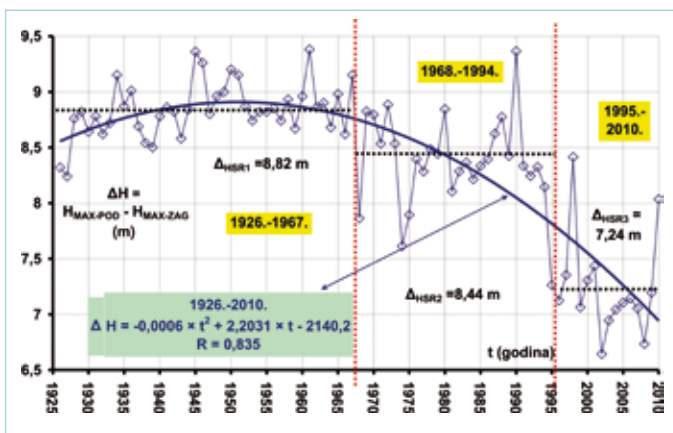


Slika 3: Niz minimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba u razdoblju 1900.-2010. (nedostaju podaci za 1913.-1919.) s ucrtanim prosječnim vrijednostima u četiri podrazdoblja

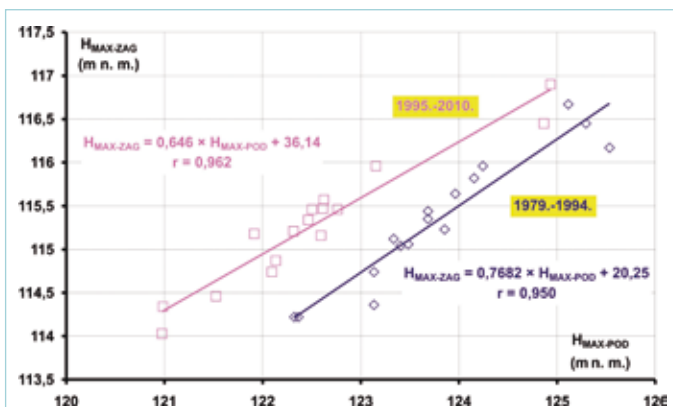
povezuje s izgradnjom spomenutog praga u koritu Save kod TETO Zagreb. Međutim, ne smije se isključiti mogućnost da se barem dijelom radi o prirodnom procesu, tj. da su erozijski procesi zaustavljeni te da je započelo razdoblje podizanja korita na analiziranoj dionici Save. Ako bi se takav proces nastavio, neophodno će biti pa-



Slika 4: Nizovi minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Podsuseda u razdoblju 1926.-2010. s ucrtanim krivuljama nelinearnih trendova i koeficijentima nelinearne korelacije



Slika 5: Grafički prikaz niza razlika istovremenih godišnjih maksimalnih vodostaja Save kod Podsuseda i Zagreba ΔH izraženih u metrima u razdoblju 1926.-2010.



Slika 6: Dva regresijska odnosa istovremenih maksimalnih godišnjih vodostaja na vodomjernim profilima Zagreb i Podsused definirana za podrazdoblje 1979.-1994. i 1995.-2010.

žljivo izučiti njegove posljedice na opasnost pojave poplava na profilu Save kod Zagreba. Podizanje dna korita, tj. smanjenje površine protočnog profila može utjecati i na povećanje opasnosti od poplava grada Zagreba i njegove šire okolice. Očigledno je da je neophodno detaljno pratiti ove procese na cijeloj dionici Save od Jesenica do Siska. Pri tome neće biti dovoljno samo koristiti podatke

minimalnih godišnjih vodostaja na pojedinim vodomjernim profilima, već će biti potrebno poduzeti i neka posebna mjerenja.

Za bolje razumijevanje uloge preljeva Jankomir i za detaljnije izučavanje procesa bitnih za obranu Zagreba od poplava analizirat će se i karakteristični vodostaji Save na profilu Podsused koji se nalazi 11,2 km uzvodno od profila Zagreb. Važno je naglasiti da se između njih nalazi preljev Jankomir. Na slici 4 prikazani su nizovi minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Podsuseda u razdoblju 1926.-2010. s ucrtanim krivuljama nelinearnog trenda i koeficijentima nelinearne korelacije R . Uočava se nešto drugačije ponašanje maksimalnih godišnjih vodostaja nego kod vodomjera Zagreb. U razdoblju prije izgradnje preljeva Jankomir (1926.-1978.) prosječni maksimalni godišnji vodostaj bio je 124,20 m n. m., dok je poslije toga (1979.-2010.) opao za 1,04 m na 123,16 m n. m.. Radi se o značajnom padu. Zanimljivo je uočiti činjenicu da maksimalni vodostaj koji se pojavio 2010. predstavlja tek petnaesti po redu vodostaj u analiziranom vremenskom nizu, dok je na profilu Zagreb bio treći. U ovom trenutku teško je dati pouzdana objašnjenja za različito ponašanje nizova maksimalnih vodostaja Save na dva bliska profila. Moguće je da su povezani s velikim regulacijskim radovima koji su utjecali na isključivanje retencijskih prostora i produblivanje korita. Ovi regulacijski radovi vremenski su obavljani usporedo s izvođenjem preljeva Jankomir. Usput treba napomenuti da je trend opadanja niza minimalnih godišnjih vodostaja Save kod Podsuseda završio tek 2001. godine, dakle sedam godina poslije nego na profilu Zagreb.

Na slici 5 nalazi se prikaz niza razlika istovremenih godišnjih maksimalnih vodostaja Save kod Podsuseda i Zagreba u razdoblju 1926.-2010. izraženih u metrima. Atribut „istovremeni“ odnosi se na maksimalne vodostaje kod jedne te iste pojave vodnog vala uvažavajući propagaciju vodnog vala od Podsuseda do Zagreba. S ove slike se uočava postojanje tri statistički značajno različita podrazdoblja. U prvom podrazdoblju (1926.-1967.) prosječna razlika iznosila je 8,82 m. U drugom (1968.-1994.) naglo je pala za prosječno 0,38 m na vrijednost od 8,44 m. U trećem aktualnom podrazdoblju (1995.-2010.) je ponovo pala i to za zabrinjavajućih prosječnih 1,20 cm u odnosu na drugo podrazdoblje. Moguće objašnjene, iako ne i jedino, treba potražiti u promjenama dna korita rijeke Save (vidi sliku 3), izgradnji stepenica i pragova i drugim radovima. Treba ukazati na činjenicu da je prosječni pad vodnog lica kod maksimalnih istovremenih godišnjih vodostaja u drugom podrazdoblju (1968.-1994.) iznosio 0,000753, dok je u trećem podrazdoblju (1995.-2010.) pao na 0,000646. Kako protok izravno zavisi o padu proizlazi da je kod velikih voda za isti vodostaj protok na profilu Zagreb danas manji nego u prethodnom podrazdoblju (1969.-1994.) Tu činjenicu treba uzeti kao ozbiljno upozorenje koje zahtijeva i detaljnije analize.

Na slici 6 prikazana su dva regresijska odnosa istovremenih maksimalnih godišnjih vodostaja na vodomjernim profilima Zagreb i Podsused definirana za podraz-

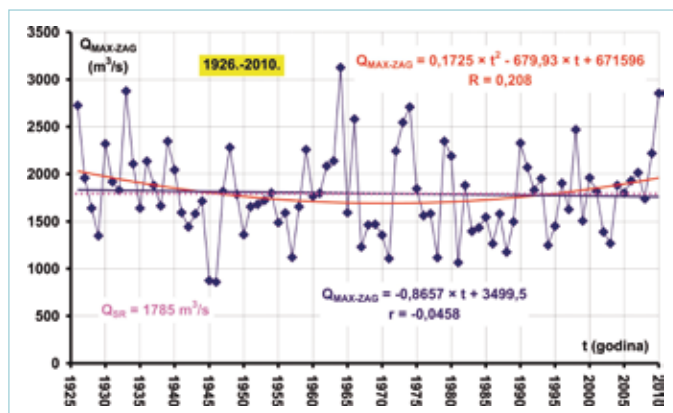
doblja 1979.-1994. i 1995.-2010. Atribut „istovremeni“ i u ovom se slučaju odnosi na maksimalne vodostaje kod jedne te iste pojave vodnog vala uvažavajući propagaciju vodnog vala od Podsuseda do Zagreba. Oba podrazdoblja spadaju u vrijeme kada je funkcionirao preljev Jankomir. Čvrstoća oba odnosa je vrlo visoka o čemu svjedoče koeficijenti linearne korelacije od $r=0,950$ za podrazdoblje 1979.-1994. i $r=0,962$ za posljednjih šesnaest godina, tj. za podrazdoblje 1995.-2010. Zabrinjavajuća je činjenica da su za isti maksimalni godišnji vodostaj na profilu Podsused maksimalni godišnji vodostaji na profilu Zagreb u posljednjih 16 godina znatno viši, u prosjeku sedamdesetak centimetara. Očito je da se radi o procesu koji treba detaljnije izučiti jer bi mogao negativno utjecati na sigurnost obrane grada Zagreba od poplave.

Osnovni zaključak koji se može izvesti na osnovi analiza izvršenih u ovom poglavlju je da su procesi promjena koji utječu na maksimalne, ali i na druge vodostaje u analiziranom prostoru izrazito dinamični kako u vremenu tako i u ovom nevelikom prostoru. Razlozi su čini se većinom antropogene prirode, ali se ne smiju zanemariti niti prirodni procesi. Činjenica je da se u posljednjih 16 godina s maksimalnim vodostajima i padovima vodnih lica na dionici Save od Podsuseda do Zagreba dešava nešto što bi moglo negativno utjecati na sigurnost obrane Zagreba od poplave. Ovo upozorenje ne smije se zanemariti, već se moraju uložiti napor da se što prije nađe znanstveno pouzdano objašnjenje.

3. ANALIZA KARAKTERISTIČNIH GODIŠNJIH PROTOKA SAVE

Na slici 7 prikazan je niz maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2010. s ucrtanim pravcem linearnog i krivuljom nelinearnog trenda te koeficijentima linearne r i nelinearne korelacije R . Uočava se da postoji vrlo blagi linearni trend opadanja koji statistički nije značajan ($r=-0,0458$). Nelinearne korelacije (parabola drugog reda) ukazuje na nešto složenije ponašanje analiziranog vremenskog niza. Do sredine sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća niz je imao karakteristike laganog podizanja vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka. Najveći maksimalni godišnji protok pojavio se 1964. godine, a procijenjen je na vrijednost od $Q_{MAX}=3126 \text{ m}^3/\text{s}$. Maksimalni protok koji se pojavio 20. rujna 2010. izravno je izmjerena na terenu u iznosu od $Q_{MAX}=2854 \text{ m}^3/\text{s}$. U razmatranom 85 godišnjem nizu to je tek treći po veličini maksimalni godišnji protok, jer je maksimalni godišnji protok Save kod Zagreba koji se pojavio 1933. godine bio procijenjen na vrijednost od $Q_{MAX}=2877 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pažljivi čitatelj uočiti će da se u tekstu ovog članka koristi pojam procijenjena vrijednost maksimalnog godišnjeg protoka, a ne izmjerena vrijednost ili točna vrijednost. Prilikom analiza velikih protoka (u slučaju Save



Slika 7: Niz maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2010. s ucrtanim pravcem linearnog i krivuljom nelinearnog trenda te koeficijentima linearne r i nelinearne korelacije R

na analiziranom potezu većih od $1500 \text{ m}^3/\text{s}$) treba biti svjestan činjenice da nije moguće, koristeći krivulje protoka (Q - H odnose), definirati točnu vrijednost maksimalnog protoka. To posebno nije bilo moguće učiniti prilikom katastrofalne poplave koja se pojavila 1964. godine kad su bili probijeni nasipi te su bile poplavljene goleme gradske površine. Već je u uvodnom poglavlju iznesena rasprava o ovoj problematici te se sada samo naglašava da točnost određivanja maksimalnih godišnjih protoka nije veća od optimistički gledano $\pm 5\%$, a možda je realnije računati s $\pm 10\%$ od procijenjenih vrijednosti.

Vodomjerni profil Save kod Zagreba kao i cijeli sliv Save do njega, čija površina iznosi 12.450 km^2 , pretrpio je tijekom analiziranog razdoblja goleme promjene koje su se morale odraziti na promjenu svih njegovih hidroloških karakteristika. To se može uočiti iz činjenice zabrinjavajućih trendova opadanja srednjih i minimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2009.

Prosječno opadanje minimalnih godišnjih protoka iznosi $0,313 \text{ m}^3/\text{s}$ godišnje ili u 84 razmatrane godine oko $26 \text{ m}^3/\text{s}$. Prethodno iznesene vrijednosti određene su analizom niza minimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2009., tj. određivanjem njenog linearnog trenda. Grafički prikaz niza minimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba nije dat zbog ograničenosti opsega članka. Pošto prosječni minimalni godišnji protok u tom razdoblju iznosi $81,6 \text{ m}^3/\text{s}$, to znači da su minimalni godišnji protoci smanjeni za 32% . Snižavanje minimalnih godišnjih vodostaja i produbljenje korita Save kod Zagreba (vjerojatno i na širem potezu) prestalo je 1994. godine. Na osnovi analize niza minimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2009. za proces smanjivanja minimalnih protoka Save kod Zagreba se ne može utvrditi da je on zaustavljen. Sa stanovišta upravljanja vodnim resursima radi se o vrlo opasnoj pojavi čijem bi se objašnjavanju trebala posvetiti mnogo veća pažnja od one koja joj se danas pridaje

Sličan i isto tako zabrinjavajući zaključak može se donijeti na osnovi analize vremenskog niza podataka

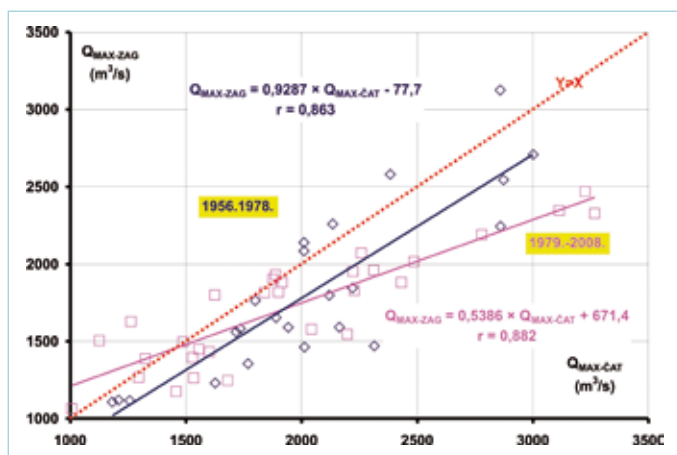
srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba. Srednji godišnji protoci opadaju u prosjeku $0,954 \text{ m}^3/\text{s}$ godišnje ili u 84 razmatrane godine oko $81 \text{ m}^3/\text{s}$. Prethodno iznesene vrijednosti određene su analizom niza srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926.-2009., tj. određivanjem njenog linearnog trenda. Grafički prikaz niza srednjih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba nije dat zbog ograničenosti opsega članka. Pošto prosječni srednji godišnji protok u razmatranom razdoblju 1926.-2009. iznosi $308,2 \text{ m}^3/\text{s}$, može se zaključiti da je došlo do smanjivanja srednjih godišnjih protoka za oko 26%. Treba istaknuti činjenicu da iako se sustavno smanjuju srednji i minimalni godišnji protoci Save kod Zagreba, do smanjivanja maksimalnih godišnjih protoka na ovom profilu nije došlo.

Za potrebe izrade točne prognoze protoka Save kod Zagreba u realnom vremenu kao osnovnog preduvjeta pouzdanog funkcioniranja sustava obrane od poplava neophodno je raspolagati s točnim podacima protoka velikih voda Save u Sloveniji. Na slici 8 prikazana su dva odnosa istovremenih maksimalnih godišnjih protoka na vodomjernim profilima Save u Zagrebu i Čatežu za dva podrazdoblja. Atribut „istovremeni“ odnosi se na maksimalne protoke kod jedne te iste pojave vodnog vala uvažavajući propagaciju vodnog vala od jednog do drugog vodomjera. Prvo podrazdoblje (1956.-1978.) se odnosi na period prije početka funkcioniranja preljeva Jankomir, dok je u drugom (1979.-2008.) preljev Jankomir bio u funkciji. Očigledno je da su odnosi značajno različiti u dva spomenuta podrazdoblja. Za protoke veće od oko $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ (početak rada preljeva) u podrazdoblju 1979.-2008. maksimalni protoci Save kod Zagreba općenito su manji nego u podrazdoblju 1956.-1978. kada preljev nije bio u funkciji. Iz toga se jasno može iščitati uloga preljeva Jankomir na smanjenje vrha hidrograma Save nizvodno od njega. Međutim, potrebno je objasniti činjenicu da je u većini godina dok preljev nije bio u funkciji maksimalni godišnji protok na stanici Čatež bio veći

nego na nizvodnoj stanici Zagreb. U prosjeku su godišnji maksimalni protoci Save kod Čateža u razdoblju prije funkcioniranja preljeva Jankomir (1956.-1978.) bili veći za oko $250 \text{ m}^3/\text{s}$, što bi se moglo objasniti činjenicom da su slovenske vrijednosti sistematski precijenjene ili da su hrvatske sistematski podcijenjene. Pitanje pouzdanosti, točnosti i usklađenosti vodomjerenja kao i definiranje i usklađivanje krivulja protoka koje vrše slovenske i hrvatske službe bitni su preduvjet za točno prognoziranje u realnom vremenu. Pri tome treba naglasiti da u pojedinim godinama ima i suprotnih slučajeva, kao na primjer kritične 1964. godine, ali i tijekom još dvanaest godine (24% analiziranog razdoblja). Objašnjenje za ovakvo ponašanje moguće je potražiti i u učincima retencioniranja valova velikih voda na potezu Save od Čateža do Zagreba. Spomenuti učinci zavise o vodnosti pritoka Save na navedenom potezu tijekom prolaska valova velikih voda Save. Ako su dotoci pritoka mali, tada se vode Save mogu razliti i retencionirati što utječe na to da su maksimalni istovremeni protoci Save kod Zagreba manji on protoka Save kod Čateža. U slučaju velikih dotoka pritocima maksimalni protok Save kod Zagreba bit će znatno veći od istovremenog protoka na profilu Čatež. Na međuslivu između ove dvije vodomjerne stanice postoje dva, tijekom pojave velikih voda, nezanemariva pritoka, Sutla i Krapina te brojni manji pritoci od kojih su najznačajniji Bregana i Gradna. Njihovi zbrojeni maksimalni godišnji protoci se kreću između $250 \text{ m}^3/\text{s}$ do više od $500 \text{ m}^3/\text{s}$, čime oni mogu značajno utjecati na nizvodni režim velikih voda.

Treba napomenuti da su i brojne druge analize istovremenih maksimalnih protoka na stanicama duž rijeke Save od Čateža do Zagreba, koje se zbog ograničenosti opsega članka ne navode, ukazale na slične nedostatke koji bi morali biti uklonjeni želi li se omogućiti točno prognoziranje realnom vremenu. Kao primjer protoke navodi se 1964. godina kada je poplavljen grad Zagreb. Maksimalni protok Save kod Čateža bio je procijenjen na $2859 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je na profilu Jesenice bio veći za $630 \text{ m}^3/\text{s}$ te je iznosio $3489 \text{ m}^3/\text{s}$. Napominje se da je maksimalni poplavni protok na profilu Zagreb bio tada procijenjen na $3126 \text{ m}^3/\text{s}$, dakle dosta je manji nego onaj na Jesenicama. To je barem dijelom moguće objasniti probojem nasipa i retencioniranja velikih količina voda na području grada Zagreba i šire. Međutim, čini se nemogućim (osim netočnim Q-H odnosima) objasniti brojne velike razlike (veće od $\pm 300 \text{ m}^3/\text{s}$) između ove dvije stanice. Maksimalni protoci u Čatežu vrlo teško mogu biti značajnije veći od istovremenih protoka Save u Jesenicama. To se eventualno može desiti kad je dotok Sutlom malen.

Zaključak je da raspoloživi podaci maksimalnih godišnjih protoka koji se koriste za analizu poplava nisu pouzdani. Ne radi se ni o kakvoj posebnoj pogrešci neke od službi, već o činjenici da je prije (gotovo do početka dvadeset prvog stoljeća) mjerenje velikih voda bilo krajnje teško, složeno, dugotrajno, opasno pa i nedovoljno točno. Malobrojna mjerenja, posebno prilikom poja-



Slika 8: Odnosi istovremenih maksimalnih godišnjih protoka na vodomjernim profilima Save u Zagrebu i Čatežu u dva podrazdoblja: 1956.-1978. (prije početka funkcioniranja preljeva Jankomir) i 1979.-2008. (poslije puštanja u rad preljeva) s ucrtanim pravcima regresije

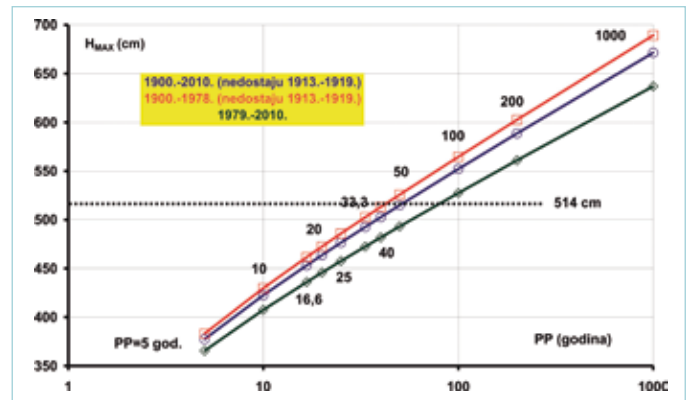
ve ekstremno velikih voda, nisu osiguravala definiranje pouzdanih krivulja protoka. Ekstrapolacije Q-H krivulja posebno su bile (i ostale) nepouzdana kod velikih voda. Nova tehnologija ADCP-a omogućila je da se stanje bitno popravi, ali ne i definitivno riješi. Neophodno je uskladiti slovenska i naša mjerenja. Treba shvatiti da to predstavlja prvenstveno hrvatski interes.

4. ANALIZA POVRATNIH PERIODA MAKSIMALNIH GODIŠNJIH VODOSTAJA I PROTOKA SAVE KOD ZAGREBA

U ovom poglavlju će se korištenjem log-normalne krivulje raspodjela izračunati povratni periodi maksimalnih godišnjih vodostaja i protoka Save kod Zagreba. Cilj ove analize je da se primjenom u hidrologiji uobičajene statističke obrade iskaže koliko je preljev Jankomir utjecao na sigurnost obrane od poplava grada Zagreba. Ovom metodom moguće je ustanoviti koliko su njegova izgradnja i funkcioniranje utjecali na povećanja sigurnosti, tj. koliko je povišen povratni period pojave ekstremnih vodostaja i protoka kao posljedica njegove izgradnje. Povećanje povratnog perioda velikih voda znači smanjivanje vjerojatnosti njihove pojave.

Radi se o analizi vjerojatnosti koja kod primjene na vremenske nizove, kao što su oni koji će biti razmatrani, ima određene nedostatke. Riječ je o činjenici da su i nizovi maksimalnih vodostaja i maksimalnih protoka Save kod Zagreba nestacionarni što dovodi u sumnju rezultate koji će biti postignuti primjenom ove metode, pošto je preduvjet za njeno korištenje upravo stacionarnost analiziranih nizova (Strupczewski i sur., 2001.). Na nestacionarnost ponašanja nizova maksimalnih vodostaja i protoka Save kod Zagreba bitan je utjecaj imao preljev Jankomir, produbljivanje korita, ali zasigurno i brojni regulacijski i drugi antropogeni radovi u uzvodnom dijelu korita i sliva Save u dugom razdoblju od 1900. do 2010. Činjenica da nije uočen nikakav trend kod nizova maksimalnih godišnjih vodostaja (slika 1) i protoka (slika 7) ne znači da su ti nizovi stacionarni, već samo to da kod njih ne postoji trend. U konkretnom slučaju pozitivno je barem to da niti niz maksimalnih godišnjih vodostaja niti onaj maksimalnih godišnjih protoka ne pokazuju postojanje statistički značajnog trenda. Osim toga, nastavno provedenu analizu treba shvatiti kao jedan od indikatora stanja, pogotovo stoga jer je u prethodnim analizama ukazano da pouzdanost pa prema tome i točnost određivanja maksimalnih godišnjih protoka (svih protoka većih od 1500 m³/s) objektivno nije visoka.

Na slici 9 ucrtane su tri log-normalne krivulje raspodjele prilagođene na tri različita niza maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba izraženih u cm. Modrom bojom označena je krivulja log-normalne raspodjele prilagođena na 104 podatka u cjelokupnom razdoblju koje je stajalo na raspolaganju, dakle od 1900. do 2010. (nedostaju 1913.-1919.). Crvenom je bojom označena krivu-



Slika 9: Log-normalne krivulje raspodjele maksimalnih godišnjih vodostaja izraženih u cm za: 1) cijeli raspoloživi vremenski niz (modra boja); 2) niz kada preljev Jankomir nije postojao (crvena boja); 3) niz kada je preljev Jankomir bio u funkciji (zeleno boja)

lja log-normalne raspodjele prilagođena na 72 podatka iz razdoblja kada nije bio izgrađen preljev Jankomir, dakle od 1900. do 1978. (nedostaju 1913.-1919.). Zelenom je bojom označena krivulja log-normalne raspodjele prilagođena na 32 podatka iz razdoblja 1979.-2010. kada je preljev Jankomir bio u funkciji. Povratni periodi PP na osi apscise izraženi su u godinama. Na slici 9 su na svakoj od tri log-normalne krivulje raspodjele označeni položaji sljedećih jedanaest povratnih perioda: 5 godina; 10 godina; 16,66 godina; 20 godina; 25 godina; 33,33 godina; 40 godina; 50 godina; 100 godina; 200 godina i 1000 godina. Crnom crtkanom linijom označen je i maksimalni vodostaj od 514 cm (117,40 m n. m.) koji je izmjereno na vodomjernom profilu Save kod Zagreba tijekom katastrofalne poplave 1964. godine.

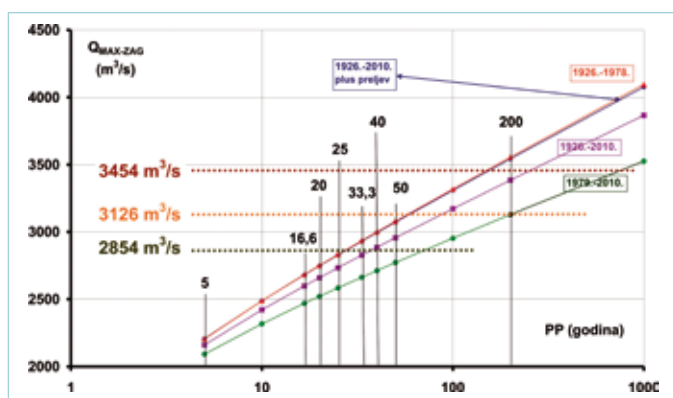
U tablici 1 su navedene vrijednosti maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba H izražene u cm i m n. m., izračunate za 11 povratnih perioda PP izraženih u godinama, definirane za tri različita vremenska niza primjenom log-normalne raspodjele. U zadnjem stupcu tablice 1 navedeni su podaci razlika vodostaja ΔH (izražen u centimetrima) za jedanaest povratnih perioda izračunatih za nizove podataka u razdoblju kada preljev Jankomir nije postojao (1900.-1978. nedostaju 1913.-1919.) te kada je bio u funkciji (1979.-2010.).

Na slici 10 ucrtane su četiri log-normalne krivulje raspodjele prilagođene na četiri različita niza maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba izraženih u m³/s. Povratni periodi PP na osi apscise izraženi su u godinama. Ljubičastom bojom označena je krivulja log-normalne raspodjele prilagođena na 85 podataka u cjelokupnom razdoblju u kojem su podaci stajali na raspolaganju od 1926. do 2010. Crvenom je bojom označena krivulja log-normalne raspodjele prilagođena na niz od 53 podatka iz razdoblja kada nije bio izgrađen preljev Jankomir, dakle od 1926. do 1978. Zelenom bojom označena je krivulja log-normalne raspodjele prilagođena na niz od 32 podatka u razdoblju kada je preljev Jankomir bio u funkciji, dakle od 1979. do 2010. Modrom bojom označena je kri-

Tablica 1: Vrijednosti maksimalnih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba H izražene u cm i m n. m., izračunate za 11 povratnih perioda PP izraženih u godinama, definirane za tri različita vremenska niza po log-normalnoj raspodjeli

PP (godina)	H ₁ (cm) 1900.-2010. nedostaju 1913.-1919.	H ₂ (cm) 1900.-1978. nedostaju 1913.-1919.	H ₃ (cm) 1979.-2010.	H ₁ (m n.m.) 1900.-2010. nedostaju 1913.-1919.	H ₂ (m n.m.) 1900.-1978. nedostaju 1913.-1919.	H ₃ (m n.m.) 1979.-2010.	ΔH = H ₂ - H ₃ (cm)
1000	671	689	637	118,97	119,15	118,63	52
200	589	603	561	118,15	118,29	117,87	42
100	552	565	527	117,78	117,91	117,53	37
50	515	526	493	117,41	117,52	117,19	33
40	503	513	482	117,29	117,39	117,08	31
33,33	493	503	472	117,19	117,29	116,98	30
25	476	486	458	117,02	117,12	116,84	28
20	464	472	446	116,90	116,98	116,72	27
16,66	453	461	436	116,79	116,87	116,62	26
10	422	430	407	116,48	116,56	116,33	22
5	377	383	365	116,03	116,09	115,91	18

vulja log-normalne raspodjele prilagođena na korigirani niz od 85 podataka u cjelokupnom razdoblju od 1926. do 2010. Korekcije su izvršene samo za maksimalne godišnje protoke u sljedećih pet godina kada je preljev bio u funkciji: 1979.; 1980.; 1990.; 1998.; i 2010. Postojećim službenim maksimalnim godišnjim protocima određenim od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda dodane su količine koje su se prelile preko preljeva Jankomir, a koje bi da preljeva nije bilo dotekle do vodomjernog profila Zagreb. Treba napomenuti da se radi o procjenama koje mogu biti podvrgnute kritici, stoga jer se zbrajanjem spomenutih protoka zanemaruju retencijski učinci korita i inundacija na potezu Save od preljeva do profila Zagreb. Stvarni protoci bili bi nešto manji od onih dobivenih spomenutim zbrajanjem. Međutim, činjenica da se modra krivulja (definirana s korigiranim podacima za cijelo razdoblje opažanja od 1926. do 2010.) gotovo poklapa s crvenom krivuljom (definirana za razdoblje kad preljev Jankomir nije bio u funkciji), jasno potvrđuje da su količine koje su se prelile preko preljeva Jankomir dobro procijenjene.



Slika 10: Log-normalne krivulje raspodjele maksimalnih godišnjih protoka izraženih u m³/s za: 1) cijeli nekorigirani raspoloživi vremenski niz (ljubičasta boja); 2) niz kada preljev Jankomir nije postojao (crvena boja); 3) niz kada je preljev Jankomir bio u funkciji (zeleno boja); 4) cijeli raspoloživi vremenski niz korigiran dodavanjem protoka koje su se prelile preko preljeva Jankomir (modra boja)

Za aktualnu 2010. godinu procijenjeno je da je maksimalni protok preko preljeva iznosio 600 m³/s. U toj procjeni od pomoći su bila mjerenja izvršena na vodomjernom profilu Blato u odteretnom kanalu Sava-Odra dana 19. rujna popodne, par sati prije pojave maksimalnih vodostaja Save kod Zagreba. Kod vodostaja od 197 cm korištenjem ADCP uređaja izmjeren je protok u kanalu od 483 m³/s. Kad se vrijednost od 600 m³/s doda onoj procijenjenoj za profil Save kod Zagreba u iznosu od 2854 m³/s proizlazi da bi kroz njega 20. rujna 2010., da nije bilo preljeva Jankomir, protekla maksimalna količina vode od 3454 m³/s. Radi se o protoku većem za 328 m³/s od onog koji se pojavio u listopadu 1964. godine.

Na slici 10 crnom crtkanom linijom označen je maksimalni protok od 2854 m³/s koji je izmjeren na vodomjernom profilu Save kod Zagreba tijekom velike vode 2010. godine. Narančastom crtkanom linijom označen je maksimalni protok od 3126 m³/s koji je određen na vodomjernom profilu Save kod Zagreba tijekom velike vode 1964. godine, a smeđom crtkanom linijom označen je tzv. korigirani maksimalni protok od 3454 m³/s za koji se pretpostavlja da bi se pojavio 2010. godine da nije bilo preljeva Jankomir.

U tablici 2 su date vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba Q izražene u m³/s, izračunate za 11 povratnih perioda PP izraženih u godinama, definirane za četiri različita vremenska niza primjenom log-normalne raspodjele. U zadnjem stupcu tablice 2 navedeni su podaci razlika protoka ΔQ za jedanaest povratnih perioda izračunatih za nizove podataka u razdoblju kada preljev Jankomir nije postojao (1926.-1978.) te kada je bio u funkciji (1979.-2010.).

Analizirajući podatke iznesene u prethodnom dijelu ovog poglavlja moguće je zaključiti da je izgradnja i funkcioniranje preljeva Jankomir utjecala značajno na sigurnost Zagreba od ugroze poplavama rijeke Save. Maksimalnom vodostaju od 514 cm koji se pojavio ti-

Tablica 2: Vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba Q izražene u m³/s, izračunate za 11 povratnih perioda PP izraženih u godinama, definirane za četiri različita vremenska niza po log-normalnoj raspodjeli

PP (godina)	Q ₁ (m ³ /s) 1926.-2010.	Q ₂ (m ³ /s) 1926.-1978.	Q ₃ (m ³ /s) 1979.-2010.	Q ₄ (m ³ /s) 1926.-2010. plus preljev	ΔQ=Q ₂ -Q ₃ (m ³ /s)
1000	3866	4097	3526	4077	571
200	3384	3555	3129	3543	426
100	3172	3318	2953	3309	366
50	2956	3079	2772	3072	307
40	2885	3000	2712	2994	288
33,33	2827	2935	2663	2930	272
25	2733	2832	2584	2828	248
20	2659	2750	2521	2747	229
16,66	2598	2683	2469	2681	214
10	2421	2488	2317	2488	171
5	2160	2204	2092	2206	112

jekom poplave 1964. godine u stanju bez preljeva odgovarao je povratni period od 31 godine. Izgradnjom preljeva Jankomir povratni period je porastao na 83 godine. Maksimalnom vodostaju od 464 cm koji se pojavio 20. rujna 2010. u razdoblju bez preljeva odgovarao bi povratni period od 18 godina. Uz funkcioniranje preljeva on je podignut na 31 godinu.

Maksimalnom protoku od 3126 m³/s koji se pojavio tijekom poplave 1964. godine u stanju bez preljeva odgovarao je povratni period od 83 godine. Izgradnjom preljeva Jankomir povratni period je porastao na 192 godine. Maksimalnom protoku od 2854 m³/s koji se pojavio 20. rujna 2010. u razdoblju bez preljeva odgovarao bi povratni period od 24 godine. Uz funkcioniranje preljeva on je podignut na 42 godine.

U **tablici 3** navedene su vrijednosti povratnih perioda PP izražene u godinama za maksimalne godišnje vodostaje i protoke Save kod Zagreba koji su se pojavili 1964. i 2010. godine, izračunati za različita trajanja vremenskih nizova kao i za niz maksimalnih godišnjih protoka korigiranih dodavanjem procijenjenih količina koje su se prelele preko preljeva Jankomir.

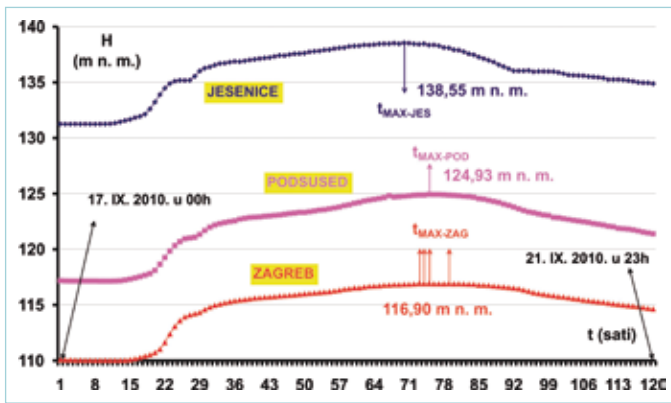
5. ANALIZA VELIKE VODE IZ RUJNA 2010.

Na **slici 11** ucrtane su satne vrijednosti vodostaja Save na vodomjernim profilima Jesenice, Podsused i Zagreb tijekom prolaska vala velike vode Save od 17. rujna 2010. u 00 sati do 21. rujna 2010. u 23 sata izražene u m n. m. Označena su vremena pojave maksimalnog vodostaja na pojedinoj stanici kao i njihove vrijednosti u m n. m. Treba uočiti da se na vodomjernom profilu Zagreb maksimalni vodostaj pojavio tijekom čak četiri sata i to ne kontinuirano već prvo tri sata, a poslije četiri sata laganog opadanja ponovo jedan sat. Važno je uočiti i to da se maksimalni vodostaj Save kod Zagreba prvi put pojavio dva sata prije maksimalnog vodostaja na vodomjernom profilu Podsused, što baš i nije za očekivati. Očigledno se radi o nestacionarnom režimu tečenja na čiju je izrazitu i naglu nestacionarnost utjecao ne samo rad preljeva, već i proboji nasipa, retencioniranje vode uzvodno i nizvodno te dotoci vode iz pritoka.

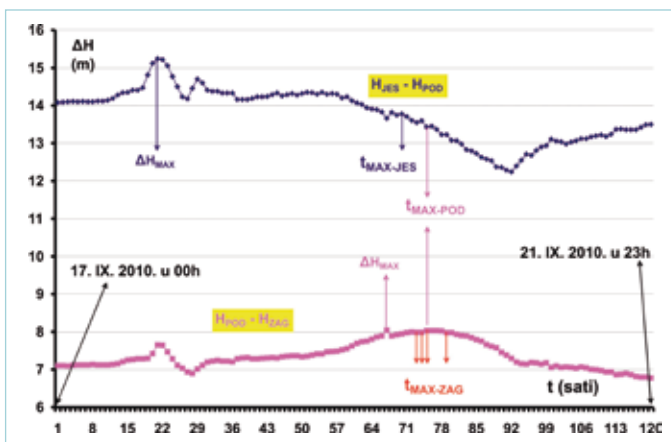
S ciljem da se barem grubo procijeni nestacionarnost režima tečenja Save na potezu Jesenice-Podsused-Zagreb na **slici 12** ucrtane su satne vrijednosti razlika

Tablica 3: Vrijednosti povratnih perioda izražene u godinama za maksimalne godišnje vodostaje i protoke Save kod Zagreba koji su se pojavili 1964. i 2010. godine, izračunati za različita trajanja vremenskih nizova, kao i za niz protoka korigiranih dodavanjen količina koje su se prelele preko preljeva Jankomir

ANALIZIRANI PARAMETAR	POVRATNI PERIOD (godina)			
	1900.-2010. (nedostaju 1913.-1919.)	1900.-1978. (nedostaju 1913.-1919.)	1979.-2010.	
H _{MAX} = 514 cm	49	41	83	
H _{MAX} = 464 cm	20	17	31	
	1926.-2010.	1926.-1978.	1979.-2010.	
H _{MAX} = 514 cm	43	31	83	
H _{MAX} = 464 cm	18	15	31	
	1926.-2010. nekorigiran niz	1926.-1978.	1979.-2010.	1926.-2010. korigiran niz
Q _{MAX} = 3454 m ³ /s	250	140	900	150
Q _{MAX} = 3126 m ³ /s	83	56	192	65
Q _{MAX} = 2854 m ³ /s	24	19	42	27



Slika 11: Satne vrijednosti vodostaja Save na vodomjernim profilima Jesenice, Podsused i Zagreb opaženi tijekom prolaska vala velike vode od 17. rujna 2010. u 00 sati do 21. rujna 2010. u 23 sata izražene u m n.m.



Slika 12: Satne vrijednosti razlika vodostaja Save na vodomjernim profilima Jesenice-Podsused (modra boja) i Podsused-Zagreb (ljubičasta boja) opažene tijekom prolaska vala velike vode od 17. rujna 2010. u 00 sati do 21. rujna 2010. u 23 sata izražene u metrima

vodostaja Save na vodomjernim profilima Jesenice-Podsused (modra boja) i Podsused-Zagreb (ljubičasta boja) opažene tijekom prolaska vala velike vode od 17. rujna 2010. u 00 sati do 21. rujna 2010. u 23 sata izražene u metrima. Na ovom se prikazu može uočiti da su maksimalne razlike vodostaja, a s njima i maksimalni padovi vodnog lica nastupali prije pojave vrhova hidrograma na tri analizirane stanice te da su se jako mijenjali tijekom relativno kratkog razdoblja vremena od 122 sata. Očito je da se pri maksimalnom vodostaju ne javlja maksimalni protok, već nešto prije.

Prema važećoj krivulji protoka Save kod Zagreba vodostaju od 464 cm odgovara protok od 2817 m³/s. Sretna je okolnost da je dana 20. rujna 2010. u 10 sati na profilu Save kod Zagreba pri vodostaju 460 cm (dakle 4 cm nižem od maksimalnog) primjenom ADCP uređaja izmjeren protok od 2854 m³/s. Taj protok je korišten kao maksimalan u ovom radu, iako će prema pravilima Državnog hidrometeorološkog zavoda vjerojatno biti korišten protok od 2817 m³/s. Međutim, vrlo je vjerojatno da se u stvarnosti pojavio nešto veći protok. Realno je pretpostaviti da je on u stvarnosti prešao vrijednost od 2900 m³/s. Procjenu realne vrijednosti bilo bi vrlo važno i

potrebno donijeti na osnovi detaljnih analiza, ako za njih bude dovoljno pouzdanih podloga.

6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNI RAD

U prethodnom dijelu ovog rada pokazano je da je sigurnost sustava obrane od poplava grada Zagreba značajno povećana izgradnjom preljeva Jankomir. Međutim, velika voda koja se pojavila u rujnu 2010. godine upozorila je na činjenicu da nema apsolutno sigurnih i konačnih rješenja nijednog pa niti ovog sustava obrane od poplava. Stoga se želi naglasiti da u sljedećem razdoblju treba u najkraćem roku uložiti sredstva i stručno-znanstvene napore na poboljšanje prognoze protoka i vodostaja Save na analiziranom potezu u realnom vremenu.

Hidrološkom analizom raspoloživih podataka opisanom u ovom radu, bilo je bar dijelom moguće ustanoviti intenzitet, ali ne i pravi uzrok, različitih promjena koje su se tijekom dvadesetog stoljeća zbivale na izučavanom području korita i sliva rijeke Save. Osim prethodno spomenutih većih antropogenih zahvata na tretiranom potezu rijeke Save postoje i brojni drugi manji i slabo ili nikako kontrolirani zahvati kao što su lokalne regulacije korita, izgradnja ili dogradnja lokalnih nasipa, proboji nasipa tijekom poplava, dozvoljena i nedozvoljena eksploatacija šljunka, crpljenje vode iz savskog vodonošnika itd. Treba posebno naglasiti da je osobito važno utvrditi stvarni doseg utjecaja praga izgrađenog u koritu Save, kod zagrebačke toplane, na režim malih i velikih voda u širem području Zagreba.

Od prirodnih fenomena mora se voditi računa o činjenici da se radi o prostoru u kojem nije isključeno da se prilikom pojave velikih voda i poplava Save mogu javiti i velike vode i poplave Sutle i Krapine, ali i Bregane te drugih lijevo- i desno-obalnih, uglavnom bujičnih pritoka. Dok velike vode Sutle i Krapine mogu čak i značajnije utjecati na pogoršanje režima poplava Save nizvodno od njihovih ušća u istu rijeku, dotle velike vode manjih bujičnih pritoka mogu uzrokovati lokalne poplave čije negativne posljedice zbog sve gušće naseljenosti mogu biti vrlo ozbiljne. Postoje indicije da je koincidencija velikih voda Save i njenih spomenutih pritoka u posljednjim desetljećima češća nego prije. Je li to stvarno tako i što je razlog toj opasnoj pojavi trebalo bi posebno izučiti. Koincidencija velikih voda Save i gore spomenutih pritoka prvenstveno je opasna za izazivanje poplava na prostorima ušća pojedinih pritoka u rijeku Savu. Činjenica je da čak i srednje visoki vodostaji rijeke Save mogu spriječiti otjecanje vode iz ovih pritoka u Savu te time uzrokovati lokalne poplave.

Poseban problem predstavlja činjenica nezavršenog sustava obrane od poplava rijeke Save oko Zaprešića. Na tom prostoru se javlja prelijevanje vode iz Save u inundacijske prostore, čak i pri srednje velikim vodama koje inače ne ugrožavaju nizvodno područje. Završavanjem izgradnje ovog dijela sustava obrane od poplava (što se

namjerava učiniti tijekom 2011. godine), spriječiti će se plavljenja tog prostora. Isključivanje prostora u kojem se retencionirala određena količina velikih voda Save imat će za posljedicu da će vrh vodnog vala Save u nizvodnom području biti nešto veći. Koliko će se on stvarno povećati stvar je ozbiljnih analiza koje se moraju provesti usporedo s izgradnjom spomenutog sustava obrane od poplava.

Osnovni problem nemogućnosti pouzdane kontrole ponašanja sustava u analiziranom sektoru Save (posebno kod velikih voda i poplava) leži u činjenici nepostojanja dovoljno dugog, kontinuiranog i pouzdanog monitoringa različitih i brojnih parametara koji bi osigurali stvaranje preduvjeta za prognoziranje vodostaja i/ili protoka u realnom vremenu. Kao prvo, hrvatska strana ne raspolaze s dovoljno podataka o kretanju valova velike vode rijekom Savom kroz Sloveniju. Osim toga, neke od postojećih vodomjernih stanica ovog sustava, posebno vodomjerni profil Save na ulazu u Hrvatsku, nisu dovoljno dobro odabrani, a da bi omogućili pouzdano mjerenje i definiranje stabilnih krivulja protoka. Činjenicu što nisu opremljeni pouzdanim mjernim instrumentima i eventualno žičarom moguće je relativno lako riješiti. Ozbiljan problem za točno prognoziranje velikih voda u realnom vremenu predstavlja to što nema preciznih krivulja protoka kojima bi se mogla pratiti nestacionarnost njihovog kretanja (Pinter i sur., 2001., 2002.).

Pregledom postojećih službeno korištenih krivulja protoka utvrdilo se da su sve definirane kao jednoznačna veza protoka i vodostaja za određeno razdoblje vremena. Činjenica da se one mijenjaju tijekom vremena ne iznenađuje pošto je u posljednjih nekoliko decenija došlo do velikog produblivanja korita, ali i do vršenja brojnih zahvata koji su utjecali na mijenjanje Q-H odnosa. Međutim, zabrinjava činjenica da niti u jednom slučaju nije definirana petlja krivulje protoka kod visokih vodostaja. Poznato je da je tijekom prolaska velikih voda tečenje izrazito nestacionarno te da se redovno javljaju značajne petlje kod krivulja protoka (Pinter i sur., 2004., 2005., 2006.). To izravno ima za posljedicu da protoci za isti vodostaj mogu biti značajno veći (može biti i više od 10% što kod velikih voda Save na analiziranom potezu može iznositi i do 500 m³/s) pri nailasku (podizanju), nego pri

odlasku (snižavanju) valova velike vode. Isto tako treba naglasiti da u tim situacijama postoji mogućnost da se najveći protok ne javlja prilikom najvećeg vodostaja, već nešto prije što zavisi o padovima energetske linije. Na lokalnu nestacionarnost tečenja Save u području od granice sa Slovenijom do preljeva Jankomir kao i na promjenu pada energetske linije mogu utjecati dotoci velikih voda Sutle i Krapine, kao i retencioniranje vode u spomenutom području oko Zaprešića.

Osobito pažljivo treba izučiti hidrološke, morfološke, ali i ekološke posljedice koje se mogu očekivati u bližoj, ali i daljoj budućnosti kao posljedica izgradnje i funkcioniranja pregrada i hidroenergetskog korištenja voda rijeke Save u Sloveniji (Bonacci i Trninić, 1991.). Izvjesno je da se njihov rad drastično promijenio hidrološki, ali i ostali režim rijeke Save u Hrvatskoj. Njihovo funkcioniranje utječe već sada na režim velikih voda i poplava Save u Hrvatskoj, ali nažalost nije dovoljno izučeno. Čini se da su moguće negativne posljedice ovih zahvata nedovoljno ozbiljno shvaćene od strane odgovornih institucija u Hrvatskoj.

Dok je do nedavno bio razumljiv i prihvatljiv nedostatak vodomjerenja kod velikih voda u posljednjih pet godina s primjenom ADCP uređaja za mjerenje protoka, taj je problem znatno ublažen iako ne i u potpunosti otklonjen. Danas je moguće organizirati pouzdana i kontinuirana mjerenja različitih hidroloških parametara primjenom novih tehnologija. Isključivo pažljivim projektiranjem novog sustava hidrološkog monitoringa bit će moguće pouzdanije kontrolirati ovako složen dinamički sustav čak i tijekom pojave ekstremnih velikih voda, dešavanja prodora nasipa i sličnih nepredvidivih situacija. To će biti moguće jedino ako se stvore uvjeti (detaljan monitoring i detaljne analize procesa) za ispunjavanje te odgovorne zadaće. Njoj se treba pristupiti s maksimalnom odgovornošću i u najbližoj budućnosti (odmah!). Problemi koji su se pojavili tijekom ove poplave u rujnu 2010. godine upravo su ukazali na velik nedostatak podataka koji bi omogućili pouzdano prognoziranje vodostaja i protoka u realnom vremenu. Pri tome je suradnja s kolegama iz Slovenije od ključnog značaja. Bez nje nije moguće organizirati pouzdanu obranu od poplava na analiziranom prostoru. ■

LITERATURA

- Bonacci O., Ljubenković I. (2003.): Procjena sigurnosti Zagreba od poplava vodama rijeke Save u novim uvjetima. *Hrvatska Vodoprivreda* XII(127-128), 51-55.
- Bonacci O., Ljubenković I. (2004.): Statistička analiza maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba 1926.-2000. *Hrvatske vode* 12(48), 243-252.
- Bonacci O., Ljubenković I. (2008.): Changes in flow conveyance and implication for flood protection, Sava River, Zagreb. *Hydrological Processes* 22(8), 1189-1196.

- Bonacci O., Trninić D. (1991.): Hydrologische, durch die Aktivität des Menschen hervorgerufene Veränderungen im Flussgebiet der Sava bei Zagreb. *Wasserwirtschaft* 81(4), 171-175.
- Kratofil L. (2000.): Promjene vodnog režima Save uzrokovane ljudskom djelatnošću. *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"* (ur. D. Trninić), 335-352.
- Pilar M., Braun M., Brundić D. (1994.): Poplava Zagreba pri pojavi velike vode Save u listopadu 1964. godine i stanje izgrađenosti zaštitnog sustava danas. *Hrvatske vode* 2(7), 443-453.

- Pinter N. (2005.): Policy forum: one step forward, two steps back on U.S. floodplains. *Science*, 308(5719), 207-208.
- Pinter N., Heine R.A. (2005.): Hydrodynamic and morphodynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA. *Journal of Hydrology* 302, 70-91.
- Pinter N., Miller K., Wlosinski J.H. (2004.): Recurrent shoaling and dredging on the Middle and Upper Mississippi River, USA. *Journal of Hydrology* 290, 275-296.
- Pinter N., Thomas R., Wlosinski J.H. (2001.): Flood-hazard assessment on dynamic rivers. *EOS Transactions of the American geophysical Union* 82(31), 333-339.
- Pinter N., Thomas R., Wlosinski J.H. (2002.): Reply to U.S. Army Corps of Engineers comment on Flood-hazard assessment on dynamic rivers. *EOS Transactions of the American geophysical Union* 82(31), 333-339.
- Pinter N., Ploeg R. R., Schweigert P., Hoefler G. (2006.): Flood magnification on the River Rhine. *Hydrological Processes* 20(1), 147-164
- Smith K., Ward R. (1998.): *Floods-Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley, Chichester.
- Strupczewski W.G., Singh V.P., Feluch W. (2001.): Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, 248, 123-142.
- Svensson C., Hannaford J., Kundzewicz Z.W., Marsh T.J. (2006.): Trends in river floods: why is there no clear signal in observations? *IAHS Publication*, 305, 1-18.

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE CITY OF ZAGREB'S SAFETY FROM FLOODS BY THE SAVA WATERS UNDER NEW CONDITIONS

Abstract. Flood waters of the Sava River on the stretch from the Slovenian-Croatian border to the town of Sisak in the second half of September 2010 revealed a necessity for a review of the existing flood defense system. With this aim, the paper presents a hydrological analysis of the series of characteristic annual water levels and discharges (primarily maximum, but also minimum and mean values) of the Sava at the water gauging profiles Zagreb and Podsused in the period from 1926 to 2010. The focus was to study the role of the weir Jankomir as the key facility for flood defense of the City of Zagreb. By application of log-normal distribution, the return periods of water levels and discharges which occurred during the catastrophic floods in 1964 and in September 2010 were determined. A separate section contains a detailed analysis of the September 2010 floods. The paper points to the problem of insufficiently reliable determination of discharges when floods pass through the analyzed stretch. It emphasizes the impossibility of building an absolutely safe system of flood defense. It is, however, both possible and necessary to take measures to minimize flood damages. An early warning system based on good quality forecast in real time is the condition to achieve this goal. The paper proposes measures which should be taken to improve forecast accuracy in real time.

Key words: floods, hydrology, water levels, discharge, Sava at Zagreb

HYDROLOGISCHE ANALYSE DER SICHERHEIT VOR HOCHWASSER DES FLUSSES SAVE BEI ZAGREB UNTER NEUEN UMSTÄNDEN

Zusammenfassung. Das Hochwasser des Flusses Save von der slowenisch-kroatischen Grenze bis Sisak wies in der zweiten September-Hälfte 2010 darauf hin, dass das bestehende Hochwasserschutzsystem überprüft werden soll. Mit diesem Ziel wird auch in diesem Beitrag die hydrologische Analyse der Reihen der charakteristischen (vor allem maximaler aber auch minimaler und mittlerer) Jahreswasserstände und Abflüsse der Save an den Pegelmessstellen Zagreb und Podsused im Zeitraum von 1926 bis 2010 dargestellt. Betonung ist auf der Untersuchung der Rolle des Hochwasserüberlaufs Jankomir als Schlüsselobjektes zum Schutz der Stadt Zagreb vor Hochwasser. Unter Anwendung der logarithmischen Normalverteilung wurden die Wiederkehrzeiträume für Wasserstände und Abflüsse bestimmt, die während des Katastrophenhochwassers in 1964 sowie im September 2010 vorkamen. Ein Kapitel gibt auch detaillierte Analyse des Hochwassers aus September 2010. Es wird auf das Problem der ungenügend zuverlässigen Bestimmung von Abflüssen des Hochwassers durch das analysierte Gebiet hingewiesen. Es wird betont, dass es unmöglich ist, ein absolut sicheres Hochwasserschutzsystem zu bauen, es ist aber möglich und notwendig die Maßnahmen zu treffen, die die Hochwasserschäden minimieren. Das auf einer Echtzeitqualitätsvorhersage beruhende Frühwarnungssystem ist die Basis für die Erreichung dieses Zieles. Es werden auch die zu unternehmenden Maßnahmen vorgeschlagen, um die Genauigkeit der Echtzeitvorhersage zu verbessern.

Schlüsselwörter: Hochwasser, Hydrologie, Wasserstand, Abfluss, Save bei Zagreb