

Stručni članak (Professional paper) | UDK: 627.14(497.5 Zagreb)

Primljeno (Received): 11. 4. 2025.; Prihvaćeno (Accepted): 25. 4. 2025.

PRILOG ANALIZI NAGLIH URBANIH POPLAVA GRADA ZAGREBA

dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emerit.

Sveučilište u Splitu, Fakultet
građevinarstva, arhitekture i
geodezije
Matice hrvatske 15, 21000 Split,
Hrvatska
E-mail: obonacci@gradst.hr

dr. sc. Tanja Roje-Bonacci, prof. emerit.

Sveučilište u Splitu, Fakultet
građevinarstva, arhitekture i
geodezije
Matice hrvatske 15, 21000 Split,
Hrvatska

dr. sc. Tatjana Vujnović

Državni hidrometeorološki zavod
Ravnice 48, 10000 Zagreb, Hrvatska

Grad Zagreb je kao i brojni drugi gradovi na svijetu, suočen sa sve razornijim naglim urbanim poplavama. Cilj ovog rada je da se preciznije utvrde njihove karakteristike kako bi se mogle poduzeti učinkovitije mjere obrane od njih. Za tu je svrhu poslužila detaljnija analiza dvije nagle poplave koje su se dogodile 3./4. srpnja 1989. i 24./25. srpnja 2020. Formiranje naglih poplava u Zagrebu specifično je stoga što su one dijelom posljedica bujičnih poplava brdskih potoka koji se s Medvednice ulijevaju u urbano tkivo. Na osnovi malog broja raspoloživih podataka pokušalo se utvrditi učinkovitost funkcioniranja retencije izgrađene na potoku Črnomerec na ublažavanje poplava nizvodno od brane. Utvrđeno je da se većina naglih poplava u Zagrebu javlja u toplom razdoblju godine, od lipnja do kolovoza. Najčešće se događaju tijekom noći, od 21 do 1 sat iza ponoći.

Ključne riječi: nagle urbane poplave, Zagreb, bujični potoci Medvednice, poplave u srpnju 1989. i 2020.

1. UVOD

Nagle poplave (*flash floods*) najčešće su posljedica konvekcijских oluja ili kišnih čelija visokog intenziteta povezanih s frontalnim olujama. Ove oluje ispuštaju velike količine oborina unutar kratkog razdoblja (Bonacci, 1994.; Bonacci i suradnici, 2006.). U nekim slučajevima uzrokovane su prodorom toplih zračnih masa koje utječu na brzo otapanje snijega. Trajanje ovih razornih fenomena je kratko, od desetak minuta do nekoliko sati. Nagle se poplave mogu pojaviti bilo gdje, ali se značajno razlikuju u ravničarskim terenima, urbanim prostorima, krškim terenima itd.

Nagle poplave događaju se s malim ili nikakvim upozorenjem i mogu dosegnuti svoj puni vrhunac za samo nekoliko minuta. Hidrogrami i/ili nivogrami imaju oštre vrhove, a vremena podizanja i recesije imaju gotovo jednako trajanje. Prognoza njihove pojave moguća je na osnovi pouzdane prognoze intenziteta oborina i određivanja precizne lokacije na kojoj će se izlučiti maksimalne količine oborina, tj. gdje će se pojaviti središte oluje koja se obično vrlo brzo kreće. Radi se o danas teško rješivom problemu. Za rano uzbunjivanje na raspolaganju stoji vrlo kratko vrijeme.

Nagle urbane poplave uzrokuju intenzivne kratkotrajne oborine koje padaju na nepropusne urbane površine. Nagle urbane bujične poplave specifičan su vid urbanih poplava povezanih s otvorenim vodotocima koji teku kroz gradsko tkivo (Bonacci, 2020.). Vrh hidrograma i/ili nivograma se javlja vrlo brzo, od desetak minuta do nekoliko sati nakon padanja intenzivnih oborina. Uglavnom se javljaju na nepropusnim urbanim slivnim površinama na kojima je infiltracija mala ili je uopće nema. Područje zahvaćeno plavljenjem rijetko prelazi nekoliko četvornih kilometara. Nagli porast protoka i izlivanje vode iz korita gradskih vodotoka dodatno ugrožava i onako opasnu situaciju, uzrokujući velike štete i dovodeći u opasnost ljudske živote u gusto naseljenim gradovima. Štete koje one izazivaju uzrokovane su naglim porastom nivoa vode, brzinama kretanja vode, plavljenjem tunela podzemnih željeznica, podrumskih i drugih podzemnih prostora te erozijom terena i deponiranjem nanosa i zagađivača.

Procesi urbanizacije su sve intenzivniji diljem planeta. Izravno utječu na ubrzavanje otjecanja, smanjenje infiltracije i pogoršavanja kvalitete vode (Pazwash, 2016.). Tečenje po površini terena ima dominantnu

ulogu u formiranju naglih urbanih poplava. Nizak kapacitet infiltracije najvažniji je čimbenik za brz i opasan razvoj naglih urbanih poplava. Urbana područja imaju manje kapaciteta za skladištenje padalina i snijega koji se otopi. Urbanizacija uključuje uklanjanje vegetacije, tla i depresija s površine terena. Antropogena površinska i podzemna infrastruktura općenito uzrokuje drastične promjene prirodnog krajolika. Nepropusne površine smanjuju infiltraciju i ubrzavaju otjecanje u jarke, propuste i potoke. Njihove guste mreže smanjuju udaljenost koju otjecanje mora prijeći kopnom ili kroz podzemne tokove kako bi došlo do prirodnih evakuacijskih subjekata, tj. mora, rijeka i/ili jezera (<https://pubs.usgs.gov/fs/fs07603/pdf/fs07603.pdf>).

Oborine koje se javljaju tijekom ovih događaja po intenzitetu i količinama premašuju vrijednosti koje se koriste za projektiranje sustava odvodnje i dimenzioniranje površinskih i podzemnih hidrauličkih struktura u gradovima. Nedovoljan kapacitet infrastrukture za odvodnju oborinskih voda snažno pridonosi razornim posljedicama poplava. Poplave u urbanim područjima nastaju kao posljedica izlivanja kućne odvodnje, kanalizacijskih sustava, sustava oborinskih voda, malih gradskih rijeka i gradskih podzemnih građevina, ali i naglog podizanja razine podzemne vode i njenog izbijanja na površinu terena. Sve ove komponente formiraju direktno otjecanje koje se sastoji od površinskog i brzog potpovršinskog otjecanja.

Kod malih, a k tome i strmih nepropusnih slivnih površina vremena koncentracije su niska. Vrijeme koncentracije je vrijeme potrebno da efektivna oborina dođe iz najudaljenije točke sliva do analiziranog profila. Vrijeme koncentracije približno odgovara vremenu dosezanja vrha hidrograma i/ili nivograma. Presudnu ulogu u formiranju urbanog poplavnog hidrograma i/ili nivograma igra vrijeme koncentracije, koje je u nepropusnom urbanom okolišu vrlo kratko, značajno kraće nego u onom prirodnom. To je glavni razlog zbog kojeg kratkotrajne intenzivne oborine uzrokuju u gradovima razorne nagle urbane poplave koje je teško, za sada još uvijek i praktično nemoguće pouzdano prognozirati. Male prostorne i vremenske skale na kojima se javljaju nagle urbane poplave otežavaju predviđanje događaja, osobito u okruženjima s malo podataka gdje vremenski modeli visoke rezolucije nisu dostupni (Xia i sur., 2011.; Bucherie i sur., 2022.).

Svaki zahvat u urbanoj strukturi, kao, primjerice, izgradnja novih zgrada, podvožnjaka, ulica, mostova, regulacija prometa kroz grad itd., može preraspodijeliti i koncentrirati smjerove tečenja. To je razlog zbog kojeg se u istom urbanom prostoru iste oborine tijekom različitih vremena mogu uzrokovati različite štete na imovini i infrastrukturi, poremećaje u gospodarskim i društvenim aktivnostima i ljudske žrtve.

Značajnu ulogu u skraćivanju vremena koncentraciji, a time i skraćivanju vremena pojave vrha hidrograma i/

ili nivograma igra i smjer kretanja oluje. U koliko se ona kreće identično sa smjerom tečenja vode u koritima otvorenih vodotoka ili s padom terena vrijeme pojave maksimuma može biti značajno kraće nego u obrnutom slučaju. Proces urbanog oborinskog otjecanja izuzetno je složen kao posljedica varijabilnosti i brzih promjena nelinearnih, vremenski i prostorno promjenjivih prirodnih, ali i čovjekom induciranih čimbenika. Uobičajene posljedice urbanizacije su povećanje vršnih protoka i/ili vodostaja kao i učestalosti javljanja naglih poplava. Kao posljedica urbanizacije, maksimalni protoci i vodostaji poplavnih hidrograma i/ili nivograma mogu se povećati do 10 puta, a volumeni poplava do šest puta, u usporedbi s onima koje se javljaju u prirodnom okruženju.

Treba biti svjestan činjenice da su urbana područja u stalnim, dinamičnim, brzim i suštinski nekontroliranim promjenama. Čak i naizgled male promjene, npr., izgradnjom ili uklanjanjem nekog objekta, a posebno izgradnjom nove ceste ili podvožnjaka, mogu značajno utjecati na mogućnost preusmjeravanja poplava i intenziviranja njihovog negativnog utjecaja. Neadekvatna infrastruktura mogla bi imati i uzrokovati katastrofalne posljedice čak i u slučaju oborina manjeg intenziteta i malog prostornog obuhvata. U urbanim prostorima često se i brzo mijenjaju karakteristike otjecanja i površine slivova, a tako i vrijeme koncentracije što dodatno otežava kontrolu i stvaranje pouzdanih modela naglih urbanih poplava.

Najopasnije posljedice naglih urbanih poplava trpe gusto naseljena urbana područja. Izuzetno brzi početak naglih urbanih poplava ograničava mogućnost učinkovitog odgovora i upravljanja u hitnim slučajevima (Ahmadalipour i Moradkhani, 2019.). Zbog ove činjenice one sve češće predstavljaju jednu od najsmrtonosnijih i najskupljih prirodnih katastrofa u cijelom svijetu. Čini se da je u posljednjim desetljećima došlo do povećanja broja naglih urbanih poplava na cijelom planetu.

Nagle urbane poplave imaju specifične i vrlo različite karakteristike u različitim gradovima, ali nerijetko i u pojedinim dijelovima istog grada. Upravo to je svojstveno za pojavu i formiranje naglih urbanih poplava u gradu Zagrebu. Za njihovo rješavanje potrebno je raspolagati brojnim lokalnim podacima i informacijama ne samo klimatskim već i onim prostornim. Zbog globalnih klimatskih promjena realno je očekivati da će nagle poplave, osobito u urbanim područjima, postati sve češće. Istodobno, nekontrolirani i nezaustavljivi proces urbanizacije, rezultat će sa sve katastrofalnijim posljedicama.

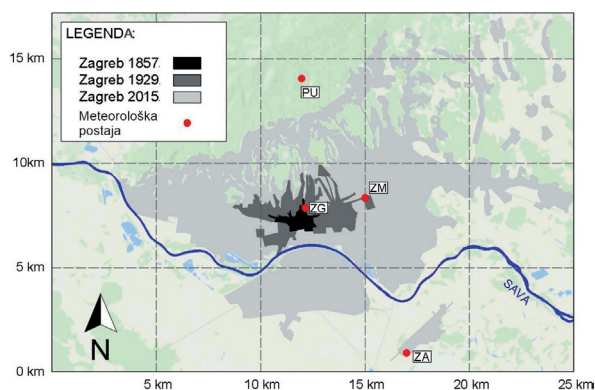
U ovom će se radu pokušati ukazati na neke vidove i specifičnost problematike naglih urbanih poplava koje se javljaju u gradu Zagrebu. Zbog njegovog položaja, regionalne (Medvednica) i lokalne morfologije terena i svojstava okoliša, formiranje i prognožiranje naglih poplava u gradu Zagrebu posebno je složeno. Kako je i u Zagrebu realno očekivati sve češće pojave naglih poplava nužno je bolje se pripremiti i intenzivirati

istraživanja vezana s ublažavanjem negativnih posljedica. Ovaj stručni članak pokušat će istražiti ulogu različitih čimbenika koristeći analizu dvaju slučajeva urbanih poplava koje su se zbile u dvama bliskim dijelovima grada. Detaljnije će se, koliko to nedovoljno brojni i nedovoljno pouzdani podaci omogućavaju, analizirati slučajevi urbanih poplava koje su se dogodile u srpnju 1989. i 2020. godine.

2. OPIS ANALIZIRANOG PODRUČJA

Planina Medvednica ili Zagrebačka gora na sjeveru nadvisuje grad Zagreb. Najviši vrh Sljeme nalazi se na nadmorskoj visini 1.033 metra nad morem (mnm). U duljini od oko 40 km pruža se u smjeru jugozapad-sjeveroistok. Najširi dio od oko 8,5 km, koji se pruža u smjeru jugoistok-sjeverozapad izravno je usmjeren prema središte grada Zagreba (Roglić, 2005.). Jasn definirani hrpt Medvednice predstavlja vododjelnicu. Njena južna, prisojna strana i administrativno pripada gradu Zagrebu. Geološke i hidrogeološke karakteristike ovog prostora vrlo su raznolike što dodatno utječe na procese podzemnog i površinskog tečenja.

Područje istraživanja prikazano je na slici 1. Na njoj su ucrtane lokacije četiri ključne meteorološke postaje: (1) Zagreb Grič (ZG); (2) Zagreb Maksimir (ZM); (3) Zračna luka Zagreb Aerodrom Pleso (ZA); (4) Puntijarka (PU). Na slici je moguće uočiti razvoj grada u razdoblju od 1987. do 2015. godine. Urbano područje grada Zagreba naraslo je s manje od 100 km² na više od 700 km², a broj stanovnika povećao se od 5.000 na oko 800.000. Pri tome treba naglasiti da se urbanizirana površina grada osobito proširila u posljednjih dvadesetak godina.



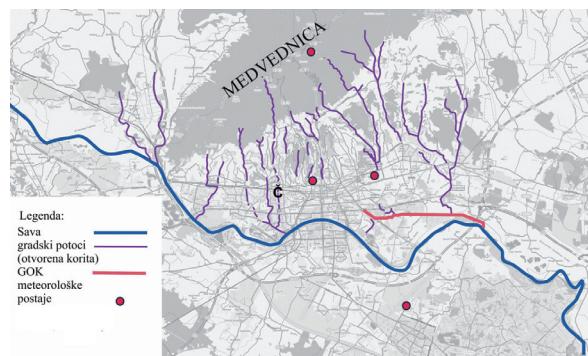
Slika 1: Prikaz razvoja urbanog područja grada Zagreba od 1857. do 2015. s naznakom lokacija četiri stozjerne meteorološke postaje na širem području grada

Na klimu grada Zagreba snažno utječu atmosferski procesi koji se odvijaju nad Panonskom nizinom, ali se osjeća i slab maritimni učinak Jadranskog mora. Pošto se urbano područje nalazi na južnom podnožju Medvednice, ova planina igra značajnu ulogu u modificiranju oborinskog režima grada (Nimac i sur., 2023.). Medvednica može djelovati kao prepreka vremenskim sustavima intenzivirajući obilne oborine na privjetrini i stvarajući kišnu sjenu u zavjetrini.

Smjer kretanja olujnog sustava ima značajnu ulogu u formiranju oborina u tom prostoru jer su zapadni dijelovi planine viši od istočnih.

Martinić (2024.) je u svojoj doktorskoj disertaciji kartirao čak 900 izvora na prisojnim padinama Medvednice. Najniži istražen izvor bio je lociran na visini od 198 mnm, a najviši na 923 mnm. Voda iz njih se koncentrira u niz stalnih i povremenih bujičnih tokova koji dotječu u različite dijelove grada Zagreba.

U radu su korišteni službeni hidrološki i klimatološki podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba.



Slika 2: Karta šireg područja grada Zagreba s ucrtanim koritima gradskih potoka

Pri analiziranju procesa pojave naglih urbanih poplava u području grada Zagreba treba biti svjestan činjenice da ih dijelom uzrokuju vode koje se izlijevaju iz tridesetak tzv. zagrebačkih potoka koji teku južnim i jugoistočnim padinama Medvednice u urbano tkivo grada (slika 2). Slovom Č označen je potok Črnomerac. Na slici su ucrtani i položaji četiri glavne meteorološke postaje. Faber i Prelogović (2023.) naglašavaju da je razvoj Zagreba oduvijek bio usko povezan s ovim potocima. Štoviše, oni su u prošlosti imali značajniju ulogu od rijeke Save. Naime, dugo je opasnost od poplave grada vodama rijeke Save smatrala ograničavajućim faktorom za širenja grada bliže njenim obalama. Većina potoka koja protječe kroz središte grada kanalizirana je u podzemlje te je tako uvedena u Savu. Potoci koji teku zapadnim padinama ruba Medvednice uglavnom se izravno uvode u Savu, a tek su manjim dijelom podzemno kanalizirani unutar nekih dijelova urbane površine. Potoci s istočnih padina Medvednice dijelom podzemnim, a dijelom površinskim umjetno kanaliziranim koritima provode vodu u glavni oteretni kanal gradske kanalizacije – GOK (Deduš i Rogulja, 2001.).

Otvoreni vodotoci koji se s južnih padina Medvednice slijevaju u grad tipične su bujice, odnosno prirodni brdski vodotoci velikog pada s nestabilnim koritom, velike snage erozije i jakim prenošenjem i odlaganjem nanosa. Na kratkim udaljenostima savladavaju velike visinske razlike. To je prije svega karakteristika potoka lociranih na zapadnom i središnjem dijelu gdje se u nekoliko kilometara savladavaju visinske razlike od 600 do 800 m. Upravo ti potoci teku prema i kroz stari, najrazvijeniji dio grada te sudjeluju u formiranju opasnih

naglih urbanih poplava. Dužina korita gradskih potoka Zagreba je procijenjena na oko 150 km (Bonacci i sur., 1976.).

Sustavi odvodnje oborinskih voda grade se s ciljem učinkovite odvodnje oborinskih voda uzrokovanih oborinama povratnog razdoblja između jedne do pet godina, a rijetko kada od 10 godina. Dimenzije ukopanih cijevi, omogućavaju stoga evakuaciju ograničenih količina vode. Dimenzioniranje korita otvorenih gradskih vodotoka projektira se na bitno veća povratna razdoblja. Glavni problem predstavlja činjenica da u gradu nema dovoljno prostora za korita koja bi mogla prihvatiti velike vode povratnih perioda viših od, primjerice, 100 godina. Uz to u Zagrebu je problem da su projektirani protoci koji su korišteni za dimenzioniranje korita kroz grad definirani pred više desetaka godina na osnovi tada nedovoljnog broja pouzdanih informacija o oborinskom režimu, osobito onom vezanom s intenzivnim kratkotrajnim oborinama koje formiraju kritične maksimalne protoke. To znači da niti u slučajevima kad su korita otvorenih vodotoka i ukopane cijevi uredno održavane oni ne mogu prihvatiti protoke koji se javljaju tijekom recentnih naglih poplava (Bonacci i Roje-Bonacci, 2020.; Novosel, 2020.). Voda koju oni ne mogu prihvatiti i evakuirati nalazi nove smjerove tečenja, obično gradskim ulicama te se retencioniра u prirodnim ili umjetnim depresijama, najčešće u pothodnicima i podrumima). Ne smije se zanemariti činjenica da su u dijelovima grada gdje funkcioniraju otvorena regulirana (kanalizirana) korita gradskih potoka najčešće isključene prirodne plavljene površine koje su nekoć služile za retencioniranje poplavnih voda i ublažavanje intenziteta poplava. Nažalost taj proces nesmiljeno se nastavlja i danas.

Nekontrolirani procesi urbanizacije, koji ne vode računa o mogućim posljedicama pojave sve češćih i sve razornijih naglih urbanih poplava, u posljednjim su desetljećima u gradu Zagrebu intenzivirani. Posebno su opasni oni koji se odvijaju na sve višim i sve strmijim padinama Medvednice. Takvim se zahvatima gotovo trenutačno utječe na smanjivanje infiltracije, skraćivanje vremena koncentracije, povećanje maksimalnih protoka i povećanje brzine tečenja. Proces erozije su stoga veći, a i stabilnost padina sve manja te je pojava klizišta sve izvjesnija. Voda kao i nanosi s viših horizonata vrlo se brzo premještaju na niža područja u kojem su gustoća stanovništva pa time i potencijalne štete sve veće.

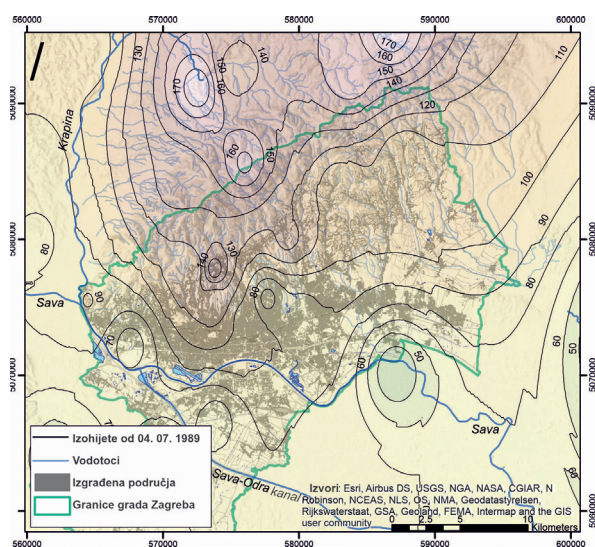
Kako bi se ublažile posljedice naglih urbanih poplava 1975. godine izrađena je studija "Rješenje obrane grada Zagreba od brdskih voda Medvednice s trasama potoka" (Bonacci i sur., 1976.). Spomenuta studija predviđjela je izgradnju 16 retencija i tri akumulacije. Od 1976. do 2001. godine izgrađeno 19 zagrebačkih retencija (Novosel, 2020.). Neke od njih su bile predviđene u spomenutoj studiji, a izvedene su i neke nove. Koliko su retencije stvarno pomogle u ublažavanju naglih urbanih poplava Zagreba i sprječavanju njihovih negativnih posljedica nedovoljno se zna. Taj je problem malo izučavan, a

glavni je razlog nepostojanje adekvatnih informacija na osnovi kojih bi se mogli donijeti pouzdani zaključci. Bez obzira na taj nedostatak opći je dojam da je 19 izvedenih retencija uspješno poslužilo svrsi zbog koje su izgrađeni.

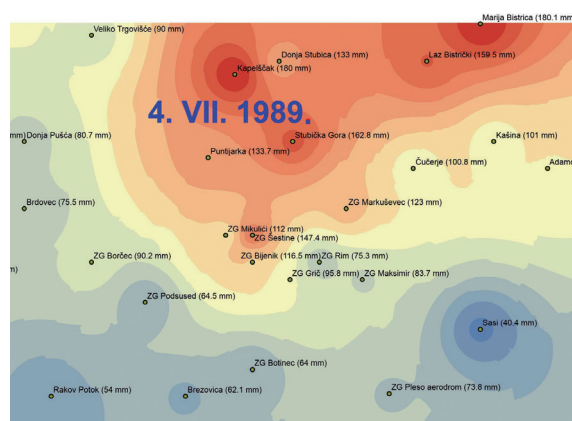
Nužno je naglasiti da se o problematici obrane grada Zagreba od naglih urbanih poplava vodi trajno računa o čemu svjedoče i sljedeće studije i elaborati: (1) *Vodoprivredna osnova Grada Zagreba uređenje potoka Medvednice*, Elektroprojekt, Zagreb, 1981.; (2) *Vodoprivredna osnova Grada Zagreba izmjene i dopune*, J. V. P. Hrvatska vodoprivreda, Organizacijska jedinica Zagreb, Zagreb, 1992. (u kojoj se, osim 19 izvedenih navodi da je planirano izvesti još 19 novih retencija); (3) *Rekonstrukcija poplavnog vala velike vode u slivu potoka Čnomerec na dan 3./4. srpnja 1989.*, Građevinski fakultet, Split, Split, 2002.; (4) *Analiza dostignutog stupnja sigurnosti od poplava bujičnih voda Grada Zagreba izgradnjom retencija i daljnje planiranje sustava*, Hidroinženjering, Zagreb i Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb, Zagreb, 2004.

3. NAGLA POPLAVA 3./4. SRPNJA 1989.

U noći od 3. na 4. srpnja 1989. pale su na širem području Zagreba vrlo intenzivne kratkotrajne



Slika 3: Karta izohijeta oborina palih 4. srpnja 1989.



Slika 4: Drugačiji prikaz karte oborina palih 4. srpnja 1989. s naznačenim čelijama

oborine koje su izazvale velike štete na dijelu sliva potoka Čnomerac uzvodno od retencije Čnomerac. Zanimljivo je da nije bilo ozbiljnijih šteta na slivu nizvodno od brane što navodi na zaključak da je retencija uspješno obavila svoju funkciju. Bujični potok Čnomerac prvi je zapadni otvoreni vodotok koji protječe kroz urbani prostor grada. Nije uveden u sustav gradske kanalizacije. Regulirano ušće u rijeku Savu mu se nalazi u blizini sportsko rekreativnog centra Mladost.

Na slici 3 prikazana je karta izohijeta oborina palih na 4. srpnja 1989. Radi razumijevanja treba napomenuti da su ove oborine pale od 7 sati 3. srpnja do 7 sati 4. srpnja. Kiša je počela padati u 16 sati 3. srpnja, a prestala je padati 4. srpnja 1989. u 2 sata. Na potoku Čnomerac postoje dvije vodomjerne postaje. Postaja Mikulići nalazi se 300 m uzvodno od brane. Njena kota nule je na visini 238,935 mnm. Površina sliva do ove postaje iznosi 4,54 km². S radom je započela 1. prosinca 1992. Prije toga je nekoliko puta mijenjala svoj položaj. Tijekom ove nagle poplave retencija je prvi put bila puna te je tada ustanovljeno da dolazi pod uspor čime je onemogućeno korištenje krivulje protoka definiranja za stacionarno stanje. Problem je da se mjerenjima na ovoj postaji ne može pouzdano kontrolirati dotok vode u retenciju kad je ona puna. Na slici 4 prikazana je ista oborinska epizoda kao i na slici 3 samo što je iz ovog prikaza jasnije uočljiv položaj konvekcijskih olujnih ćelija. Najveća količina kiše je izmjerena na postajama Marija Bistrica (180,1 mm), Kapelšćak (180 mm), Stubička Gora (162,8 mm), Laz Bistrički (159,5 mm). Sve se nalaze sa sjeverne strane Medvednice. Na tom su području formirane nagle poplave koje su prčinile ogromne štete. Na postaji Šestine izmjereno je 147,4 mm kiše. Ova konvekcijska ćelija zahvatila je relativno malu površinu točno iznad sliva potoka Čnomerac uzvodno od retencije.

Retencija na potoku Čnomerac formirana je nasutom branom visine 12 m, duljine 202,1 m i zapremine 29.460 m³. Izgrađena je 1989. godine. Zapremina retencije iznosi 127.480 m. Kota krune brane je na visini 240,16 mnm dok kota preljeva iznosi 239,12 mnm. Pri punoj retenciji temeljni ispušt ima kapacitet od 4,85 m³/s.

Vodomjerna postaja Frateršćica 1 nalazi se 2,2 km nizvodno od brane. Kota nule je na visini 144,73 mnm. Započela je s radom 13. prosinca 1972. Površina sliva potoka Čnomerac do profila ove postaje iznosi 6,7 km².

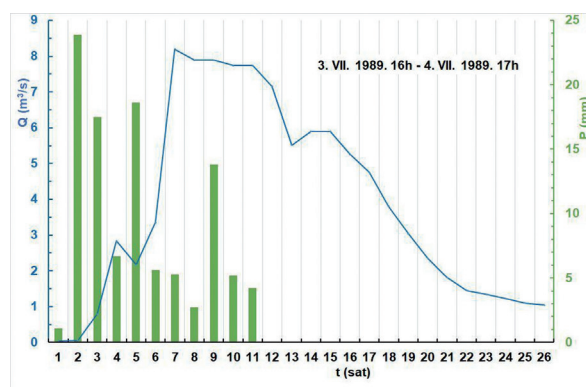
Pošto postaja Mikulići ne omogućava pouzdano definiranje protoka kod visokih vodostaja kod prolaska vala velike vode 3. i 4. srpnja 1989. nisu definirane protoke. Na slici 5 prikazan je hijetogram oborina palih na sliv Čnomerca i hidrogram protoka definiranih na vodomjernoj postaji Frateršćici 1 od 3. srpnja 1989. u 16 sati do 4. srpnja 1989. u 17 sati. Maksimalni protok od 8,2 m³/s pojavio se 3. srpnja u 22 sata, dakle šest sati nakon početka padanja kiše i pet sati nakon najintenzivnije oborine koja je pala u 17 sati i koja je iznosila 23,9 mm.

4. NAGLA POPLAVA 24./25. SRPNJA 2020.

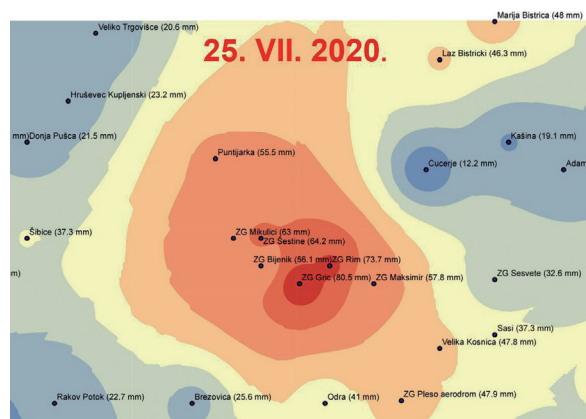
Nimac i sur. (2022.) su u radu objavljenom u časopisu *Natural Hazards* detaljno opisali brojne hidrometeorološke vidove nagle urbane poplave koja se u gradu Zagrebu, osobito u njegovom najstrožem centru, dogodila 24./25. srpnja 2020. Određeni aspekti poplave objašnjeni su i u radu Novosela (2020.). Kako bi se izbjeglo ponavljanje činjenica zainteresirane se upućuje na spomenuta dva rada, kojima je pristup na internetu slobodan. Kako bi se bolje mogli shvatiti razmjeri ove nagle urbane poplave čitatelje se upućuje da pogledaju video uradak: https://youtu.be/6g_m3hhRTgE.

U nekom dijelovima grada, osobito u naselju Trnje, voda je iz šahtova pod pritiskom šikljala i do metar i pol u vis te je počela ulaziti i u kuće. Ispod dijela Trnja podzemno je do Save proveden potok Kunišćak, prvi istočni potok do Čnomerca.

U petak 24. srpnja dijelove Hrvatske zahvatilo je jako grmljavinsko nevrijeme. Ono je u dijelovima grada Zagreba uzrokovalo formiranje razorne nagle urbane



Slika 5: Grafički prikaz hijetograma oborina palih na sliv Čnomerca i hijetogram protoka izmjenjenih na postaji Frateršćica 1 od 3. srpnja 1989. u 16 sati do 4. srpnja 1989. u 17 sati



Slika 6: Karta oborina palih 25. srpnja 2020. s naznačenim ćelijama pljuska

Postaja	4. VII. 1989.	25. VII. 2020.
PUNTIJARKA	133,7	55,5
ZAGREB-GRİČ	95,8	80,5
ZAGREB-MAKSIMIR	83,7	57,8
ZAGREB-AER. PLESO	73,8	47,9

Tablica 1: 24-satne oborine izmjerene na četiri stožerne postaje u gradu Zagrebu tijekom dvije analizirane nagle urbane poplave

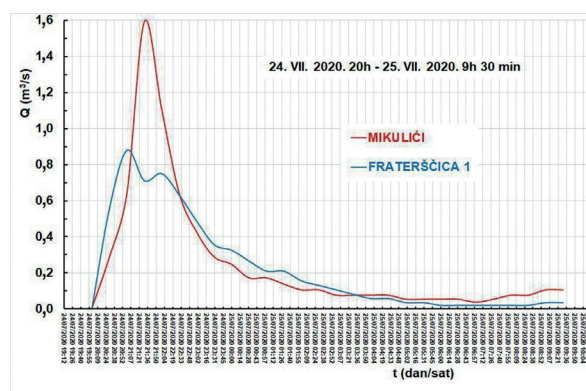
poplave. Na slici 6 prikazan je oborinski režim izmjeren 25. srpnja 2020. Obuhvaćeno je razdoblje od 24. srpnja u 7 sati do 25. srpnja 2020. u 7 sati. Usporede li se slike 3 i 4 sa slikom 6 uočiti će se da je u ovoj epizodi formirana samo jedna konvekcijska ćelija koja je središte imala upravo iznad lokacije postaje Zagreb Grič. Važno je uočiti da je središte bilo nizvodno od postojećih retencija. Poplave u središtu Zagreba bile su mnogo veće i razornije nego one koje su se pojavile u srpnju 1989. godine.

U tablici 1 navedene su oborine izmjerene na četiri stožerne postaje grada Zagreba tijekom dviju naglih urbanih poplava, čiji su položaji prikazani na slikama 1 i 2. Bitno je uočiti da je 4. srpnja 1998. na postaji Zagreb Grič izmjereno 95,8 mm kiše što je bilo 15,3 mm više nego 5. srpnja 2020. Identična je situacija bila i na ostale tri stožerne gradske postaje. Iako su oborine u poplavi koja se odvila 1989. bile znatno veće nego one iz 2020. štete su u gradu Zagrebu, osobito u najužem središtu, 2020. bile znatno veće.

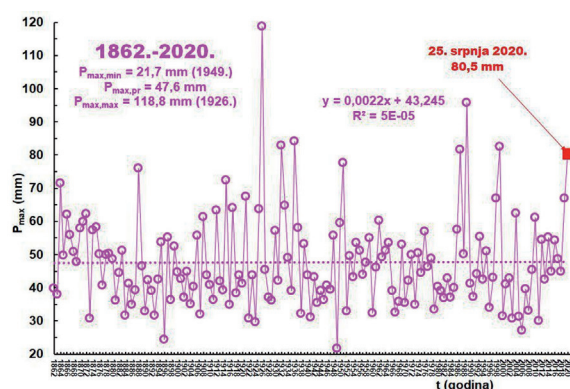
Osnovni razlog je u neobično velikom intenzitetu izlučenih oborina (Nimac i suradnici, 2022.). Glavnina oborina pala je u vrlo kratkom razdoblju. Na postaji Zagreb Grič između 20 i 21 sat palo je 58,9 mm kiše. Radi se o do sada najvećem izmjenom intenzitetu oborina na toj lokaciji. Ta je vrijednost premašila do tada izmjereni jednosatni maksimum od 52,0 mm iz 1976. godine. Ombrografska mjerenja na postaji Zagreb Grič izvide se od 1910. godine. Procijenjeno je da se radi o stogodišnjem povratnom razdoblju. Kako je u idućih sat vremena palo još 18,1 mm oborine čime je dvosatni intenzitet kiše od 77,0 mm/2 h toliko rijedak događaj da se može očekivati prosječno jednom u više od 400 godina (https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.php?section=onnlm=objave&el=procjenjena&daj=pr29072020).

Važno je uočiti da je na postaji Fratersčica 1 dana 24. srpnja 2020. u 21 sat zabilježen maksimum hidrograma od 0,88 m³/s. Ta mala vrijednost posljedica je toga jer je na postaji Šestine zabilježena oborina od 64,2 mm što je znatno manje od oborine pale 4. srpnja 1989. koja je iznosila 147,4 mm. Retencija se nije popunila. Na slici 7 su ucrtani hidrogrami na postajama Mikulići i Fratersčica 1 iz kojih je vidljivo da je retencija utjecala na smanjivanje vrha vodnog vala nizvodno od brane.

Na postaji Zagreb Grič 25. srpnja 2020. izmjerena je količina oborina od 80,5 koja odgovara povratnom razdoblju od 41 godine. Na slici 8 ucrtan je niz maksimalnih godišnjih 24-satnih oborina opaženih na postaji Zagreb Grič od 1862. do 2020. Pravac regresije i



Slika 7: Hidrogrami protoka opaženih na vodomjernim postajama Mikulići (crveno) i Fratersčica 1 (plavo) od 24. srpnja u 16 sati do 25. srpnja 2020. u 9 sati 30 minuta



Slika 8: Niz maksimalnih godišnjih 24-satnih oborina opaženih na meteorološkoj postaji Zagreb Grič od 1862. do 2020.

njegov koeficijent determinacije R^2 jasno potvrđuju da ne postoji nikakav trend porasta 24-satnih oborina u vrlo dugom razdoblju od čak 158 godina. Najveća oborina u iznosu od 118,8 mm bila se pojavila 1926. godine.

Zaključak bi mogao biti da klimatske promjene nisu uzrokovale povećanje maksimalnih 24-satnih oborina na lokaciji postaje Zagreb Grič. Jesu li one utjecale na povećanje kratkotrajnih intenzivnih oborina tek će trebati detaljno izučiti i donijeti pouzdane i argumentirane zaključke. Otvoreno je pitanje hoće li to uopće biti moguće utvrditi na osnovi podataka kojima se raspolaže. Kako je prethodno objašnjeno brojni drugi čimbenici, a velikim dijelom urbanizacija, glavni su faktori koji utječu na mogućnost pojave snažnijih i razornijih naglih poplava u različitim dijelovima grada

Zagreba. Jedino što se može relativno sigurno zaključiti je da se ovakve poplave u gradu Zagrebu mogu češće očekivati u toplom dijelu godine, od sredine lipnja do kraja rujna (Čapka i Gajić-Čapka, 1992.; Bonacci i Matešan, 1999.; Gajić-Čapka i Cindrić, 2011.; Bonacci i Roje-Bonacci, 2019.). Međutim, to ne znači da njihova pojava nije moguća i u drugim dijelovima godine.

Važno je uočiti da su se obje analizirane nagle urbane poplave dogodile u večernjim satima. Bonacci i Matešan (1999.) analizirajući intenzitete pet minutnih mjerenja oborina na ombrografima Zagreb Grič i Zagreb Maksimir utvrdili su da raspodjela oborina tijekom vremena (godine, mjeseca, dana) nije ravnomjerna. Na analiziranim postajama oko 90 % oborina intenziteta većeg od 0,2 mm/min padne u razdoblju od svibnja do listopada. One s intenzitetom većim od 1,2 mm/min najčešće se javljaju u trima ljetnim mjesecima, od lipnja do kolovoza. Taj intenzitet uzrokuje nagle urbane poplave. To je jedan od razloga zbog kojeg je borba s urbanim poplavama u Zagrebu još izazovnija.

Količina, raspored i pojava intenzivnih oborina na širem području grada Zagreba pod izravnim je utjecajem. Ovisi o međudjelovanju prevladavajućih zračnih masa, topografije i drugih procesa formiranja snažnih olujnih oborina. Poslijepodnevne i večernje intenzivne padaline mogu se objasniti interakcijom lokalne topografije i konvektivnog zagrijavanja tijekom dana, no za preciznije objašnjenje potrebna su detaljna mjerenja i istraživanja.

5. ZAKLJUČCI

Sudbina javljanja sve češćih i sve razornijih naglih urbanih poplava nije zaobišla ni grad Zagreb. U njemu su stvari još kompleksnije i zbog razvijene regionalne (utjecaj Medvednice) morfologije terena i zbog lokalne morfologije i lokalnih, intenzivnih i potpuno nekontroliranih procesa urbanizacije. Osim toga u Zagrebu se javljaju obične gradske poplave i one uzrokovane ili barem pojačane poplavama iz gradskih potoka, tj. bujica koje se s Medvednice slijevaju u grad.

Čini se da postaje jasno da je potrebno prihvatiti i u svakodnevni život ugraditi koncept UNESCO-a nazvan "ŽIVJETI S POPLAVAMA". Radi se o tome da se shvatilo da poplave nije moguće apsolutno spriječiti. Stoga je prvenstveno potrebno izbjeći ljudske žrtve i na najmanju moguću mjeru svesti štete koje one izazivaju. Da bi se to postiglo potrebno je pripremiti sve gradske strukture i građane za učinkovitu obranu.

U svijetu je postalo jasno da postojeća i ona teorijska i ona praktično inženjerska znanja o naglim poplavama nisu dovoljna da bi se vodila efikasna borba s njima. U posljednje vrijeme

intenzivno se razvijaju modeli kojima se pokušava naći učinkovite odgovore (npr., Leandro i sur., 2009.; Li i sur., 2024.; Wang i sur., 2024. itd.). Kako stvari sada stoje još uvijek su i znanost, a još više praksa daleko od djelotvornih odgovora na sve ozbiljnije izazove.

Kako u praksi stvoriti učinkovita rješenja ključno je pitanje na kojem u gradu Zagrebu treba vrlo intenzivno i interdisciplinarno raditi. Činjenica je da se ovoj problematici nije posvećivala odgovarajuća pažnja. Postojeći sustavi upravljanja i kontrole (čak i oni u najrazvijenijim državama svijeta) pokazali su se nedovoljno efikasnim te je nužno hitno i značajno mijenjati kompletan pristup urbanizaciji i odvodnji, a također raditi na teoretskim i praktičnim rješenjima ove ekstremno složene i opasne problematike. Za početak bi bilo korisno pokušati formirati arhivu naglih poplava u gradu Zagrebu. Bez obzira na činjenicu što će sigurno nedostajati brojne informacije iz prošlosti ova bi arhiva mogla pomoći u rasvjetljavanju i rješavanju problematike. Bilo bi važno prilikom zahvata u procese urbanizacije grada barem pokušati razmotriti kako bi oni mogli utjecati na formiranje naglih poplava ili kako bi ih se trebalo zaštititi od njih.

Pred gradom Zagrebom je veliki izazov. Bilo bi dobro da politika i struka to shvate krajnje ozbiljno. ■

LITERATURA

Ahmadalipour, A.; Moradkhani, H. (2019). A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996-2017. *Journal of Hydrology*, 578, 124106. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106>.

Bonacci, O. (1994). Oborina glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus. Geing, Split.

Bonacci, O.; Jelovečki, D.; Husarić, J.; Havoić, M. (1976). Prijedlog rješenja potoka grada Zagreba. *Građevinar*, 28(9), 384-393.

Bonacci, O.; Ljubenkov, I.; Roje-Bonacci, T. (2006). Karst flash floods: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(2), 195-203, <https://doi.org/10.5194/nhess-6-195-2006>.

Bonacci, O.; Matešan, D. (1999). Analysis of precipitation appearance in time. *Hydrological Processes*, 13(11), 1683-1690. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990815\)13:113.O.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990815)13:113.O.CO;2-S)

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2019). Analiza dnevnih, mjesečnih i godišnjih oborina Zagreb Griča (1862.-2017.) za potrebe inženjerske hidrologije. *Hrvatske vode*, 27(107), 7-20.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2020). Inženjersko hidrološki vidovi poplave Zagreba. *Hrvatska vodoprivreda*, XXVIII(232), 57-61.

Bucherie, A.; Werner, M.; van den Homberg, M.; Tembo, S. (2022). Flash flood warnings in context: combining local knowledge and large-scale hydro-

meteorological patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(2), 461-480. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-461-2022>.

Čapka, B.; Gajić-Čapka, M. (1992). A case analysis of heavy rainfall causing flash floods. *Theoretical and Applied Climatology*, 45(1), 77-82. <https://doi.org/10.1007/BF00865998>.

Deduš, B.; Rogulja, V. (2001). GOK u Projektu optimalizacije kanalizacijskog sustava Zagreb (POKS). *Građevinar*, 53(4), 241-249.

Faber, M.; Prelogović, V. (2023). Medvednica mountain streams in spatial planning of Zagreb. *Hrvatski geografski glasnik*, 85(1), 65-98. <https://doi.org/10.21861/HGG.2023.85.01.03>.

Gajić-Čapka, M.; Cindrić, K. (2011). Secular trends in indices of precipitation extremes in Croatia, 1901-2008. *Geofizika*, 28(2), 293-312.

Leandro, J.; Chen, A. S.; Djordjević, S.; Savić, D. A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 495-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037).

Li, Y.; Osei, F. B.; Hu, T.; Shi, Y.; Stein, A. (2024). Urban inundation mapping by coupling 1D – 2D models and model comparison. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 103869. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103869>.

Martinić, I. (2024). *Hidrološka i geomorfološka obilježja izvora prisojne strane Parka prirode Medvednica*. Dr. sc. Prirodoslovno-matematički

fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Nimac, I.; Cindrić Kalin, K.; Renko, T.; Vujnović, T.; Horvath, K. (2022). The analysis of summer 2020 urban flood in Zagreb (Croatia) from hydro-meteorological point of view. *Natural Hazards*, 112(1), 873-897. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05210-4>.

Novosel, T. (2020). Fenomen urbanih poplava – osvrt na poplavu u Zagrebu. *Hrvatska vodoprivreda*, XXVIII(232), 51-56.

Pazwash, H. (2016). *Urban storm water management*. CRC Press, Boca Raton, USA. <https://doi.org/10.1201/b10847>.

Roglić, J., 2005: *Geomorfološke teme. Sabrana djela Josipa Roglića, Knjiga II*. Meridijani, Samobor.

Wang, S.; Wang, J.; Xin, K.; Yan, H.; Li, S.; Tao, T. (2024). Urban flood modeling with a novel coupling method of surface and sewer hydrodynamic processes. *Water Science & Technology*, 89(11), 3021-3034. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.172>.

Xia, J.; Falconer, R. A.; Lin, B.; Tan, G. (2011). Modelling of flash flood risk in urban areas. *Water Management*, 164(6), 267-282. <https://doi:10.1680/wama.2011.164.6.267>.

<https://pubs.usgs.gov/fs/fs07603/pdf/fs07603.pdf> (pristupljeno 15. veljače 2025.)

<https://www.efas.eu/en/news/urban-flash-flood-zagreb-croatia-july-2020> (pristupljeno 15. veljače 2025.)

https://youtu.be/6g_m3hhRTgE (pristupljeno 15. veljače 2025.)

A CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF URBAN FLASH FLOODS IN THE CITY OF ZAGREB

Abstract: Like many other cities in the world, the City of Zagreb faces increasingly destructive urban flash floods. The aim of this paper is a more accurate determination of their characteristics to enable more effective protection measures against them. To this end, a detailed analysis of two flash floods that occurred on 3/4 July 1989 and 24/25 July 2020 was used. The formation of flash floods in Zagreb is specific, since they are partly a result of torrential flooding by mountain streams flowing down from Mt. Medvednica into the urban area. Based on a small number of available data, an attempt was made to define the effectiveness of the retention storage built on the Črnomerec watercourse in mitigating floods downstream of the dam. It was determined that flash floods in Zagreb mostly occur in the warm period of the year, from June to August, during the night, from 9 pm to 1 am.

Key words: urban flash floods, Zagreb, torrential streams on Mt. Medvednica, floods in July 1989 and 2020

BEITRAG ZUR ANALYSE URBANER STURZFLUTEN IN DER STADT ZAGREB

Zusammenfassung: Die Stadt Zagreb ist, wie viele andere Städte der Welt, mit zunehmend verheerenden Sturzfluten konfrontiert. Das Ziel dieser Arbeit ist, die Eigenschaften dieser Sturzfluten genauer zu bestimmen, damit wirksamere Hochwasserschutzmaßnahmen ergriffen werden können. Diesem Zweck diene eine detaillierte Analyse der zwei Sturzfluten, zu denen es am 3./4. Juli 1989 und 24./25. Juli 2020 kam. Die Auslösung von Sturzfluten in Zagreb ist spezifisch, weil sie teilweise auf reißende Fluten von Gebirgsbächen zurückzuführen sind, die vom Berg Medvednica in das Stadtgebiet fließen. Auf der Grundlage der wenigen verfügbaren Daten wurde versucht, die Wirksamkeit des am Bach Črnomerec errichteten Rückhaltebeckens bei der Eindämmung von Überschwemmungen unterhalb des Damms zu ermitteln. Es wurde festgestellt, dass die meisten Sturzfluten in Zagreb während der warmen Jahreszeit von Juni bis August auftreten. Sie ereignen sich am häufigsten nachts, zwischen 21 Uhr und 1 Uhr.

Schlüsselwörter: urbane Sturzfluten, Zagreb, reißende Bäche der Medvednica, Überschwemmungen im Juli 1989 und 2020
